

地盤切削を用いた矩形エレメント掘進工法の
開発に関する研究

Study on Development of Rectangular
Element Digging Method Using Mechanical
Ground Cutting

2018 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建設工学専攻 構造工学研究

長尾 達児

Tatsuji NAGAO

目 次

第 1 章 序論	1-22
1. 1 はじめに	1
1. 2 交差構造物構築工法の変遷	1
1.2.1 立体交差のはじまり	
1.2.2 立体交差の分類	
1.2.3 アンダーパス工法の変遷	
1.2.4 各種工法の概要	
1. 3 非開削工法における既往の研究と課題	15
1.3.1 エレメント設置精度	
1.3.2 地表面への影響	
1.3.3 推進・けん引力	
1. 4 非開削工法における問題点と本研究の目的	19
1. 5 本論文の構成	21
第 2 章 新しいエレメント掘進工法の開発	23-61
2. 1 概 要	23
2.1.1 従来工法における課題	
2.1.2 地盤切削を併用したエレメント掘進工法	
2. 2 地盤切削ワイヤー性能確認試験	25
2.2.1 試験目的	
2.2.2 試験概要	
2.2.3 試験結果	
2. 3 実証試験 I	29
2.3.1 実証試験用刃口の製作	
2.3.2 実証試験 I 概要	
2.3.3 試験設備	
2.3.4 確認および計測項目	
2.3.5 試験結果	
2.3.6 成果と課題	
2. 4 まとめ	61
第 3 章 開発工法の改良	62-84
3. 1 開発工法の課題と対策	62
3.1.1 駆動モーターのトラブル対策	
3.1.2 地盤切削ワイヤーの破断対策	
3.1.3 プーリーの磨耗・損傷対策	
3.1.4 姿勢制御のための対策	
3. 2 実証試験 II	70
3.2.1 試験ヤード	
3.2.2 実験設備	
3.2.3 実証試験 II 結果（1 回目）	
3.2.4 実証試験 II 結果（2 回目）	

3. 3 考 察	80
3.3.1 刃口の姿勢制御管理	
3.3.2 けん引力	
3.3.3 地表面の変位	
3.3.4 総 括	
3. 4 ま と め	84
第 4 章 施工実績	85-111
4. 1 工事概要	85
4.1.1 事業概要	
4.1.2 構造物概要	
4.1.3 施工条件	
4. 2 施工管理手法	90
4.2.1 作業時間帯	
4.2.2 刃口姿勢管理	
4.2.3 軌道計測管理	
4. 3 施工実績	95
4.3.1 施工状況	
4.3.2 刃口姿勢制御	
4.3.3 けん引力	
4.3.4 軌道変位	
4. 4 ま と め	111
第 5 章 施工計画手法の確立	112-136
5. 1 施工計画における安全性の検討	112
5.1.1 検討目的	
5.1.2 切羽安定性に対する検討	
5.1.3 上戴土砂滑動に対する検討	
5. 2 ガイドパイプ敷設工	120
5.2.1 工法分類	
5.2.2 各工法の概要	
5.2.3 土質条件と地下水に対する適用性	
5. 3 標準エレメント寸法	124
5.3.1 HEP&JES 工法における標準エレメント寸法	
5.3.2 運搬に関する法令・規制	
5.3.3 運搬車両	
5.3.4 エレメントおよび刃口の標準寸法	
5.3.5 軌道変位	
5. 4 計測項目	133
5. 5 ま と め	136
第 6 章 結 論	137-140
参考文献	141-144
謝 辞	145

第1章 序 論

1. 1 はじめに

国内のインフラストラクチャーの拡充にとともに、鉄道と道路や高規格道路と道路等の立体交差化が進められている。これらの建設にあたっては、既存の交通容量と安全性を確保しながら新しい交差構造物を構築するという特殊な条件化での施工が求められる。また、立体交差は、既存の交通路線の上に主に橋梁形式で構造物を建設するオーバーストと、既存の交通路線の下に主にトンネル形式で構造物を建設するアンダーパスに大別される。

わが国では高度成長期より、この施工条件に特化した数々のアンダーパス工法が開発され適用されてきた。本論文は、筆者が長年携わってきたこれらのアンダーパス工法の開発の経緯とそれらの技術的特徴を概観するとともに、その技術的課題等について論じ、またその課題の解決策として開発してきた工法（以下、開発工法と呼ぶ）の開発の経緯ならびに行ってきた検討、実証実験、工法改良について詳述するものである。本論文の最後には、この開発工法が適用された工事における施工計画、実績についてとりまとめ、より安全性を高めるための今後の施工管理手法を提案する。

1. 2 交差構造物構築工法の変遷

1.2.1 立体交差のはじまり¹⁾

戦後のわが国の経済復興と高度成長にとともに、全国の道路網、鉄道網が整備、拡大されていく一方で、交通事故の増大という重大な問題が顕在化した。中でも踏切事故は、当時の国鉄の輸送力増強計画が実施された昭和20年代から30年代前半にかけて、自動車交通量の飛躍的増加と列車の増発、高速化にとともに急増した。

ちなみに、昭和24年度の年間踏切事故件数は、国鉄・民鉄を合わせて1,500件程度であったが、30年度には4,000件、そして、34年度には5,000件を超えるに至った。この背景には、モータリゼーションの進展、列車運転の高密度化といった状況の変化および当時の交通安全意識の遅れとともに、基本的には踏切道整備の立ち遅れがあった。

政府は、こうした踏切事故を防止し交通の安全を確保するため、昭和36年11月に「踏切道改良促進法」を公布・施行した。同法では、国が踏切道における交通量、事故の発生状況等を考慮して、踏切道の立体交差化もしくは構造の改良等の方法を定めて指定し、鉄道事業者および道路管理者に改良の実施を義務づけるとともに、要する費用の一部を補助金として交付するなどの助成措置を講ずることとしたものである。

同法は、昭和36年から41年までの5年間の時限立法であったが、その後、41年、46年、51年と3回の改正を行い、現在まで継続されている。同法により53年までに指定された立体交差化すべき踏切道は、国鉄、民鉄を合わせて1,485箇所、構造改良すべきもの3,152箇所、警報機、遮断機等の保安設備を設けるべきもの19,973箇所であったが、平成24年までに、このうち立体交差化60.9%、構造改良75.2%、保安設備97.4%が完成されている。また、同法により指定された踏切道を除く踏切道についても、立体交差化3,180箇所、構造改良25,378箇所、保安設備の整備41,668箇所が昭和36～53年度までに整備されている。

しかし、国土交通省が平成 19 年 4 月公表した踏切交通実態総点検結果によると、緊急に対策の検討が必要な踏切として 1,960 箇所存在し、その内訳として開かずの踏切 589 箇所、ボトルネック踏切 839 箇所、歩道が狭隘な踏切 645 箇所としている²⁾。ここで、開かずの踏切とはピーク時間の遮断時間が 40 分/時以上であり、ボトルネック踏切とは一日あたりの踏切自動車交通遮断量（自動車交通量と踏切遮断時間との積）が 5 万台時以上、もしくは一日あたりの踏切自動車交通遮断量



写真 1.2.1 連続立体交差の例³⁾

と踏切歩行者等交通遮断量（歩行者および自転車の交通量と踏切遮断時間との積）の和が 5 万台時以上かつ一日あたりの踏切歩行者等交通遮断量が 2 万台時以上になる踏切である。

このように、わが国においては、鉄道と道路の交差部における安全対策の向上、渋滞による経済損失の解消を目的として、これらの緊急性を要する踏切道の改良を推進するため、踏切道改良促進法の改正や、踏切道等総合対策事業の創設などの取り組みを行っているが、いまだに多くの課題をかかえている状況である。



写真 1.2.2 単独立体交差（アンダーパス）の例

1.2.2 立体交差の分類

鉄道と道路の立体交差は、以下のように大別される。

(1)連続立体交差

複数の道路（踏切）と平面交差している鉄道を一定区間連続的に高架化（写真 1.2.1³⁾）もしくは地下化するもので、多くの踏切を一度に除却できる反面、日照の問題や地下水流動等環境に与える影響も大きく、周辺住民の合意形成を得るまでに時間を要するなどの問題もある。

(2)単独立体交差

鉄道と平面交差している道路（踏切）を単独で立体交差するもので、橋りょうにより線路上空で交差させるものをオーバース、トンネル構造等で線路の下側を交差させるものをアンダーパスと呼ぶ（写真 1.2.2）。オーバースは、一般的に鉄道に与える影響がアンダーパスに比べて小さい反面、道路周辺の民家の日照の問題や歩行者の利便性が課題となり、周辺住民の合意形成に長い期間を有する場合が多い。アンダーパスは周辺の民家や歩行者への影響は小さいが、アプローチ部の取り付け延長の関係から、営業する鉄道直下をごく小土被りでトンネル構築を行う必要があるという特徴を有し、軌道への影響を最小限にとどめることが求められる。

1.2.3 アンダーパス工法の変遷

立体交差工事では、鉄道と道路（踏切）、双方の交通容量およびそれぞれの安全性を確保しながら、狭隘な施工環境で工事を進め、構造物を構築する必要がある。特に、アンダーパス工法については、都市部に人口が集中したわが国において独自に発展した技術であり、近年は海外への技術展開されている。

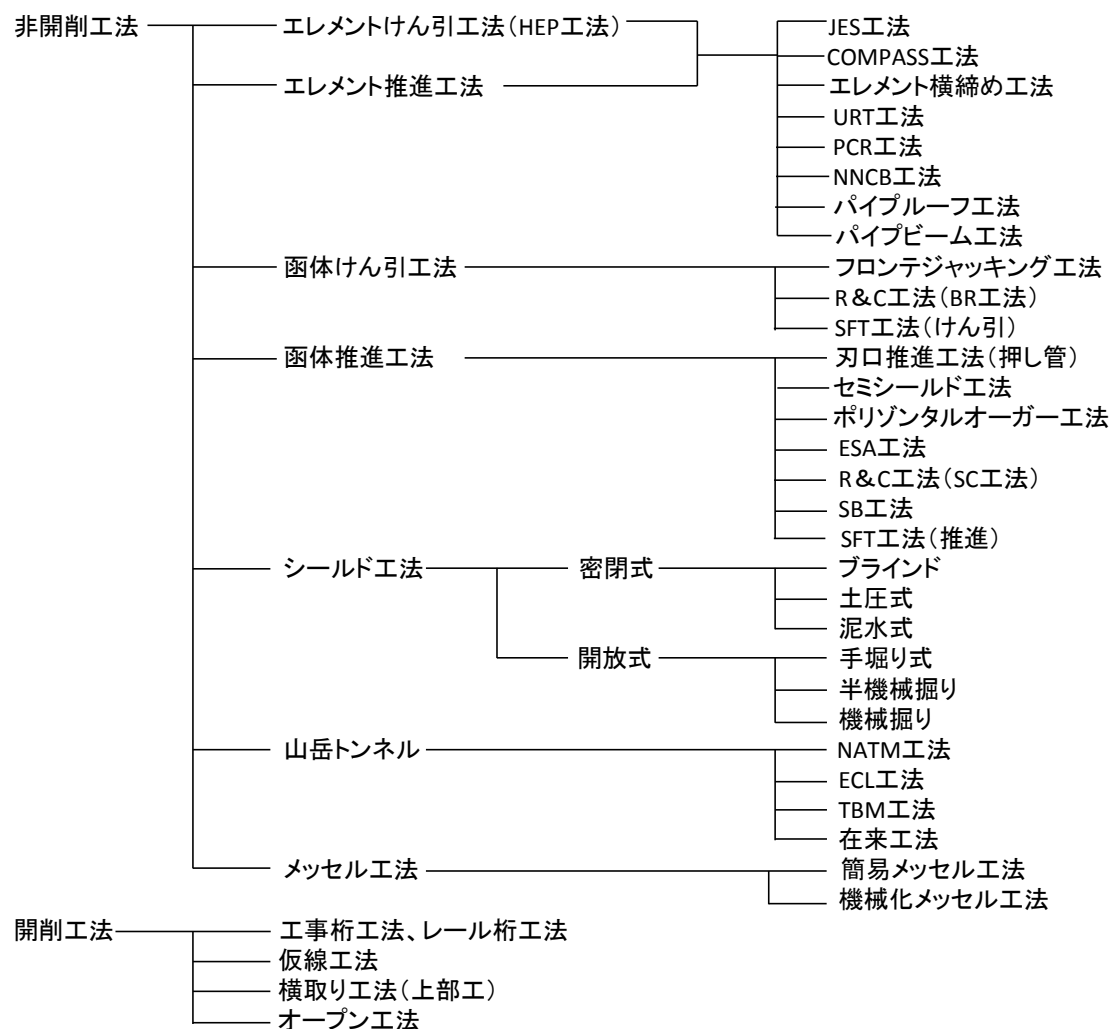


図 1.2.1 アンダーパス施工方法の分類⁴⁾

営業する線路の下に交差道路等の構造物を構築する場合、大きく分けて、線路を仮移設したり、仮設の橋りょうで線路を受けた状態で地上から掘削し、構造物を構築する開削工法と、交差計画箇所では線路を挟む形で立坑を構築し、線路はそのままの状態での両立坑間にトンネルを構築する非開削工法に分類される。図 1.2.1⁴⁾はこれらの施工方法の分類を示したものである。

このうち、非開削工法は、先に述べたように、アプローチ部の取り付け延長の制限を有する場合が多く、一般的に、1m 程度の少ない土被りで、上部に営業線をかかえた状態でのトンネルの掘削が必要であること、またトンネルの延長は比較的短いことを特徴とする。鉄道運行の安全性確保の観点から非開削工法では掘削防護工の設置（補助工法）を前提としており、この防護工とトンネル掘削方法の組合せから種々の工法が開発、適用されてきた。図 1.2.2⁵⁾は主な施工方法の変遷を示したものである。

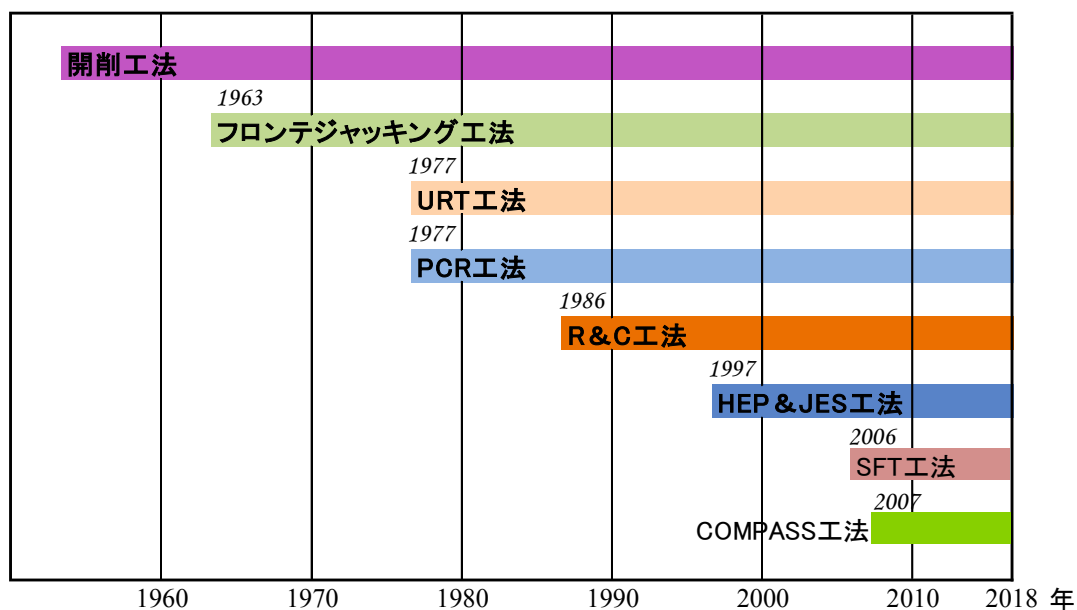


図 1.2.2 アンダーパス施工方法の変遷⁵⁾

1. 2. 4 各種工法の概要

図 1.2.2 に示す代表的な非開削工法について以下に概要を述べる。現在実用化されている非開削工法は、掘削防護工として仮設の $\phi 600\text{mm}$ ～ 1000mm 程度の円形断面や $\square 800\text{mm} \times 800\text{mm}$ 程度の矩形断面鋼管を利用し、本体構造物は別途鉄筋コンクリートのボックスカルバートで構築するものと、そこから派生し仮設として用いられている小断面の鋼管等を本体利用するものとに大別される。



写真 1.2.3 パイプルーフ打設完了時の例

(1)パイプルーフ工法

パイプルーフ工法は、上部交通と交差する箇所の両側に立坑を構築し、立坑内から、上部交通の直下に計画する横断構造物の外周に沿って、比較的小断面の鋼管（ $\phi 600\text{mm}$ ～ $1,200\text{mm}$ 程度）を敷設し、そのパイプルーフを支保しながら内空断面を掘削する工法である。パイプルーフは、1960 年代より山岳トンネルの補助工法として用いられてきたが、アンダーパス工法では、上載荷重に対して高い剛性が必要なこと、また土中の支障物等を人力により撤去することが可能であることから、管径 800mm 以上のものが多く用いられている^{6), 7)}。

横断構造物は形成した内部空間において支保工を巻き込み、もしくは盛り替えながら鉄筋コンクリート造のボックスカルバートで構築する。写真 1.2.3 はパイプルーフの打設完了時点を示した例である。

(2) フロンテジャッキング工法

フロンテジャッキング工法は、1967 年、旧国鉄岐阜工事局により信越線下の横断にはじめて採用された、非開削のアンダーパス工法としてもっとも初期に開発された工法である。前述のパイプルーフを補助工法とするもので、構築するボックスカルバートの外周にパイプルーフを敷設するところは前述したパイプルーフ工法と同様であるが、この工法ではその後、立坑内でボックスカルバートを構築し、その前方に専用の特許刃口を取り付け、到達側に設置した反力体と特許刃口を PC 鋼より線で連結して、専用のフロンテジャッキを使用し、ボックスカルバートを上部交通直下の所定位置までけん引する工法である。ボックスカルバートのけん引時は、刃口内での掘削、土砂搬出、土留めとけん引作業を交互に行う。ボックスカルバートのけん引には、土質条件や工事規模に応じて、相互けん引方式、片引けん引方式、それらの分割けん引方式が用いられ、大断面、長距離での施工を可能としている⁸⁾。図 1.2.3、図 1.2.4 は相互けん引方式および片引けん引方式の施工順序を示した図である。

■施工順序（相互けん引方法）

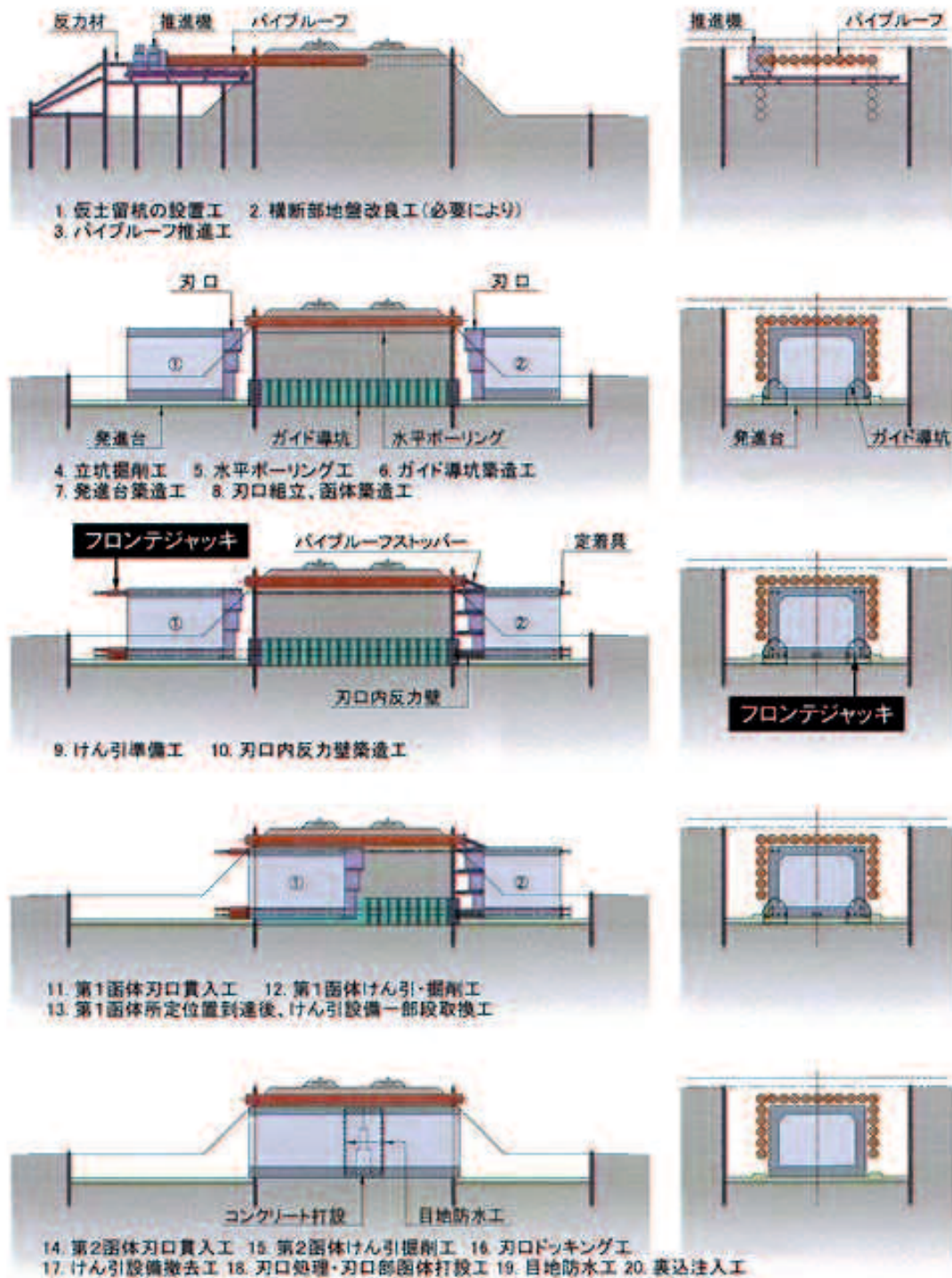


図 1.2.3 フロンテジャッキング工法の施工順序（相互けん引方法）⁸⁾

■施工順序（片引けん引方法）

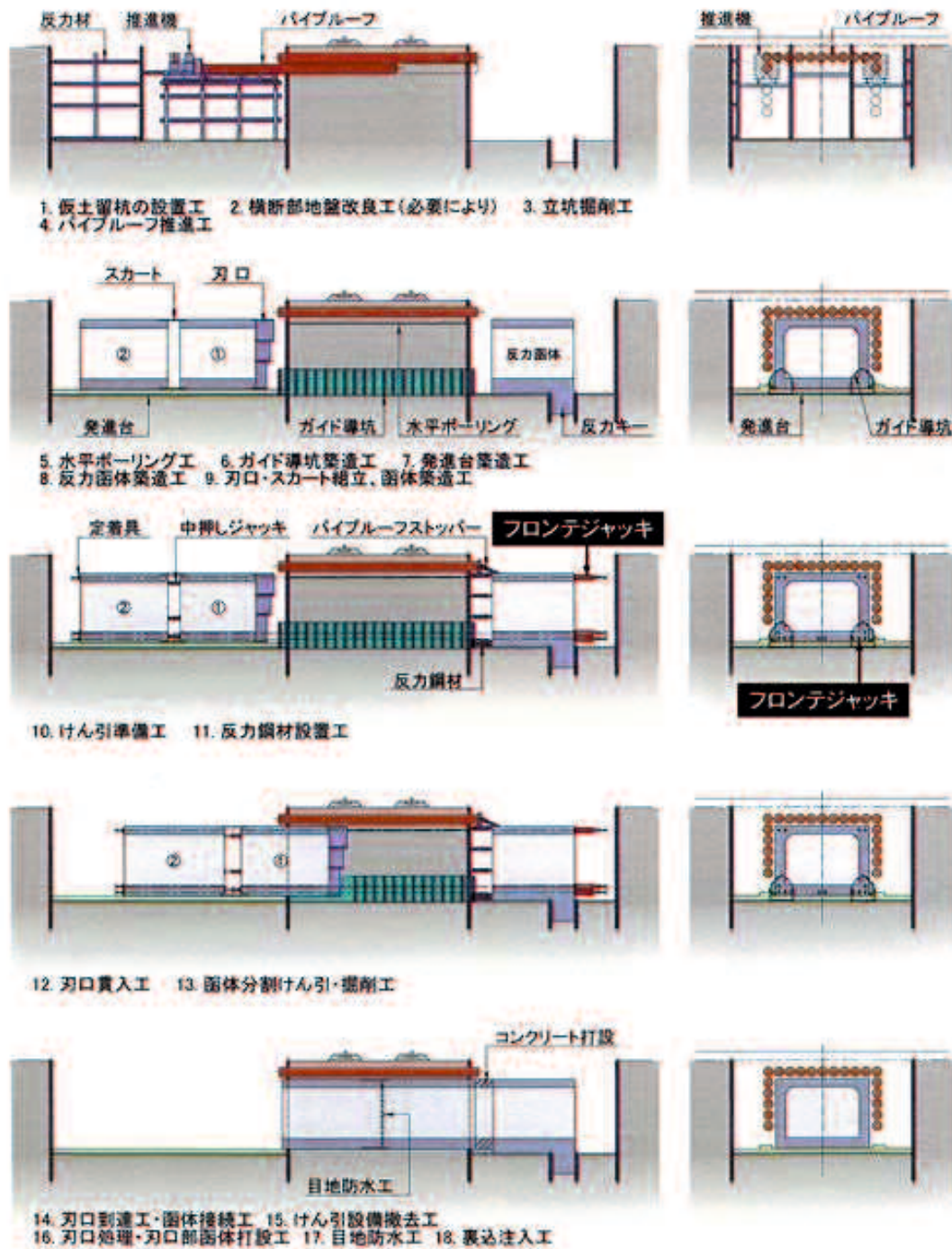


図 1.2.4 フロンテジャッキング工法の施工順序（片引けん引方法）⁸⁾

(3)R&C 工法 (BR 工法, SC 工法)

R&C 工法は、先行技術であるフロンテジャッキング工法の改良技術として、1984 年に千葉県柏市の雨水幹線工事に採用されたのが最初の適用事例である。フロンテジャッキング工法では、上部交通の施工基面からの土被りを大きくとらなければならないという課題があったが、R&C 工法はボックスカルバート上部のパイプルーフを、ほぼ正方形断面の箱形ルーフとし、ボックスカルバートの外縁（上面）と合致するように敷設する工法である。ボックスカルバートの外周に箱形ルーフを設置した後に、ボックスカルバートをけん引または推進し、箱形ルーフを押し出していくことで、上部の土砂の落ち込みによる陥没を防止しながら、小さな土被りでボックスカルバートを設置することを可能としている。函体の施工方法は、フロンテジャッキによりけん引するけん引方式（図 1.2.5）と、後方から押し込んでいく推進方式（図 1.2.6）に大別される。ボックスカルバートのけん引または推進時は、刃口内での掘削，土砂搬出，土留めとけん引または推進作業を交互に行う点ではフロンテジャッキング工法と同様である。

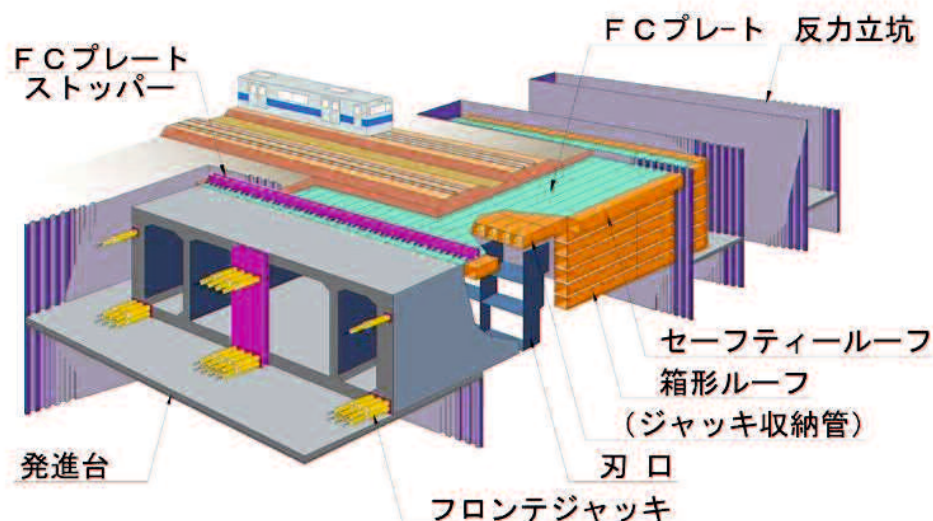


図 1.2.5 R&C 工法（けん引方式）の概要⁹⁾

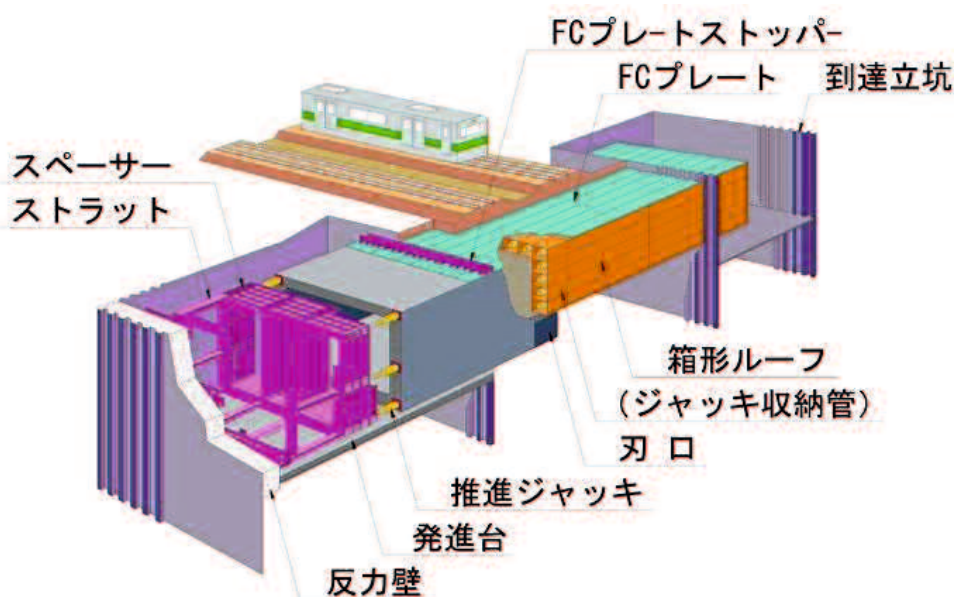


図 1.2.6 R&C 工法（推進方式）の概要⁹⁾

(4)COMPASS 工法

COMPASS 工法は、JR 東日本長野支社により 2007 年大糸線南神城・神城間において土石流対策の横断水路として用いられたのが最初の適用事例である。

立坑内に築造（設置）したボックスカルバートを、防護工で上部交通の安全性を確保しながら移動させ所定の位置に設置する点においては、フロンテジャッキング工法や R&C 工法と同様である。COMPASS 工法は対象を歩道や水路のような小断面横断構造物に限定することで、補助工法としての防護工を従来のパイプルーフや箱形ルーフではなく鋼板とし、この鋼板を先行して設置するガイドパイプ（塩化ビニル管 $\phi 300\text{mm}$ ）を利用しながらワイヤーソーで 2 本のガイドパイプ間の地盤を切削し、形成された溝に鋼板を挿入する方法である。図 1.2.7 はこの鋼板挿入工の概要を示したものである。ボックスカルバートの外周面に鋼板を設置した後、ボックスカルバートの前方の刃口をけん引しながら掘削と土砂搬出とを交互に繰り返す点は、これまでに述べた工法と同様であり、図 1.2.8 はこの函体けん引工の概要を示したものである。

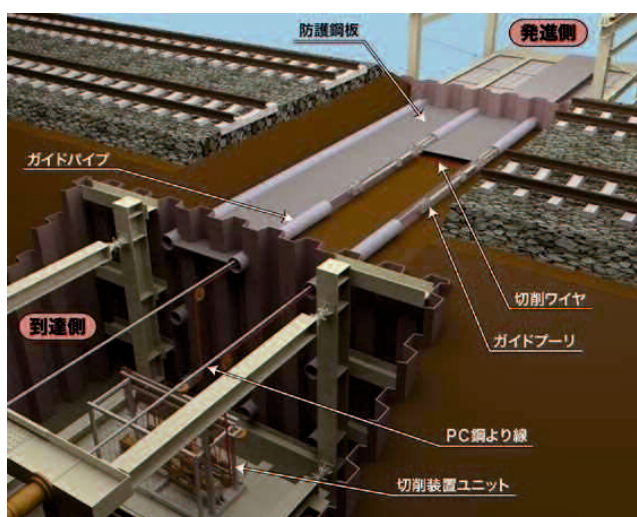


図 1.2.7 COMPAS 工法の概要（鋼板挿入工）¹⁰⁾

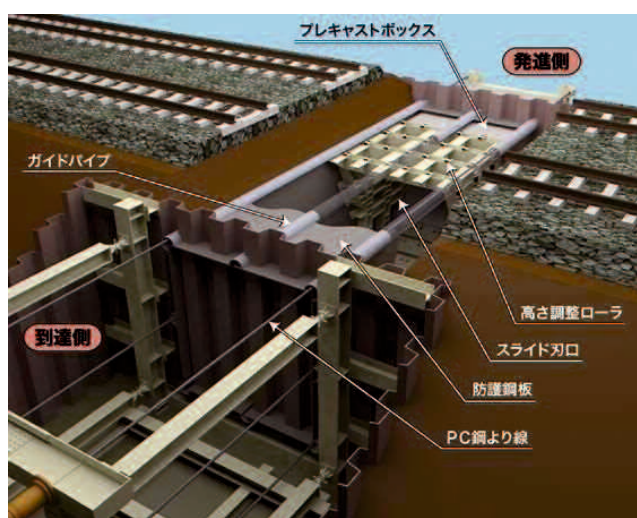


図 1.2.8 COMPAS 工法の概要（函体けん引工）¹⁰⁾

(5)SFT 工法

SFT 工法は、2006 年に東京電力富津火力発電所内の水路新設工事ではじめて適用され、その後、JR 九州の日豊本線下の道路用ボックスカルバートの構築に適用された。

この工法は、R&C 工法で用いられた箱形ルーフをボックスカルバート 4 面すべての外縁に合わせた位置に先行敷設するものであり、立坑内で築造されたボックスカルバートとこの箱形ルーフを連結し、ボックスカルバートを押し込みながら、到達側で箱形ルーフおよびその内側の土塊を回収していくものである。上部交通下での掘削を行うことなく、ボックスカルバートを順次移動することを可能とした工法である。到達側で箱形ルーフおよび内部土塊の回収を行うことから、ボックスカルバートはその後方に反力体を設け推進工法により押し込む方法、もしくは到達立坑の後方に反力立坑を設け、けん引する方法を選択することができる。図 1.2.9、図 1.2.10 はそれぞれの方式の概要を示したものである。

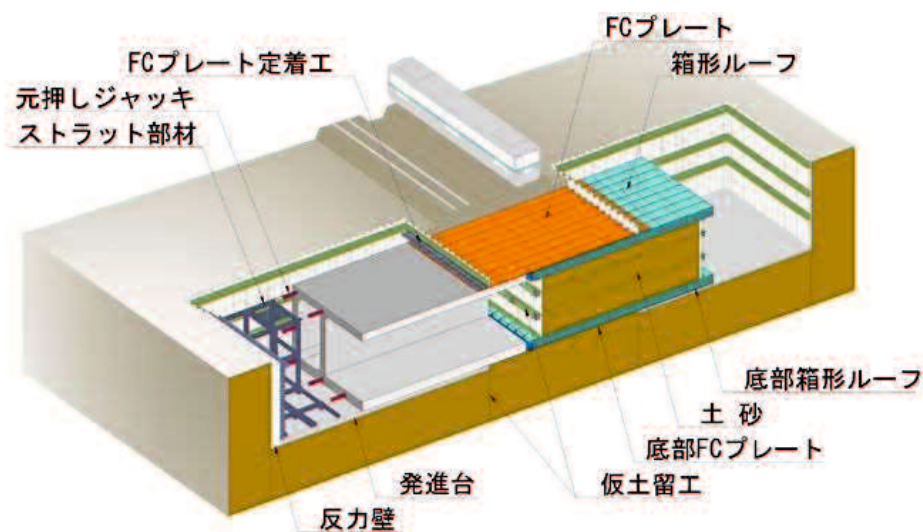


図 1.2.9 SFT 工法（推進方式）の概要¹¹⁾

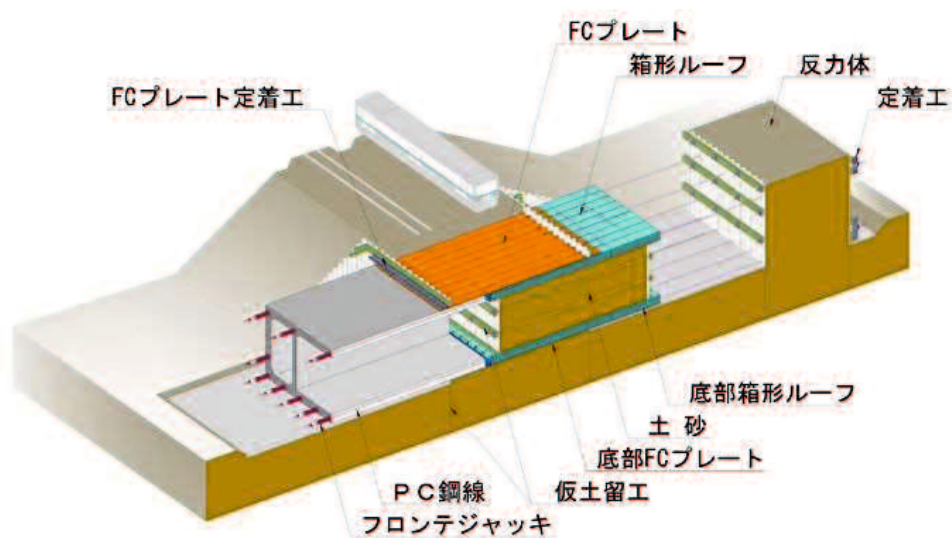


図 1.2.10 SFT 工法（けん引方式）の概要¹¹⁾

(6)URT 工法

URT 工法（Under Railway/Road Tunneling Method）は，補助工法として用いたパイプルーフなどの防護工を本体構造物として使用した初めての工法であり，1978 年に国鉄水戸鉄道管理局により常磐線の下で適用されている．URT 工法は上部交通の両側に築造した発進・到達立坑を使用し，4 隅に施工上ガイドとして使用する継手を有する角形鋼管（エレメント）を機械掘削（もしくは人力掘削）によりアンダーパスの必要断面の外周に沿って設置し，内部にコンクリートを充填することで本体構造物とする．当初 URT 工法は，図 1.2.11 に示すように，線路の下を横断方向に設置した複数本のエレメント端部を立坑内に構築する鉄筋コンクリートもしくはプレストレスコンクリートの主桁で巻き込む，いわゆる下路桁構造とし，その主桁を U 型の橋台等で支持する構造を標準としていた．

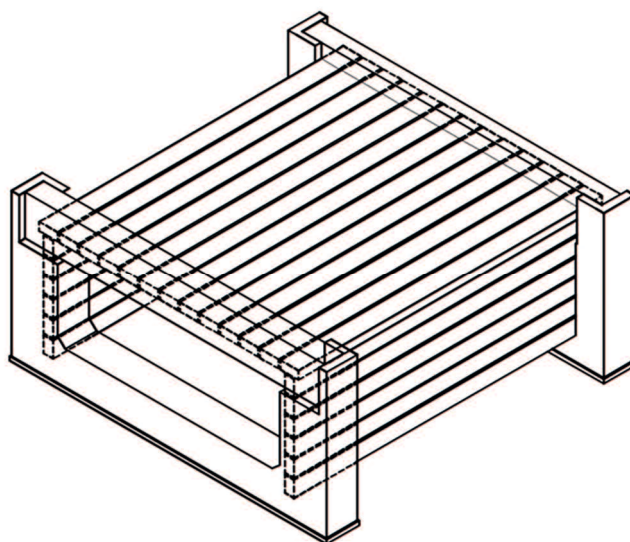
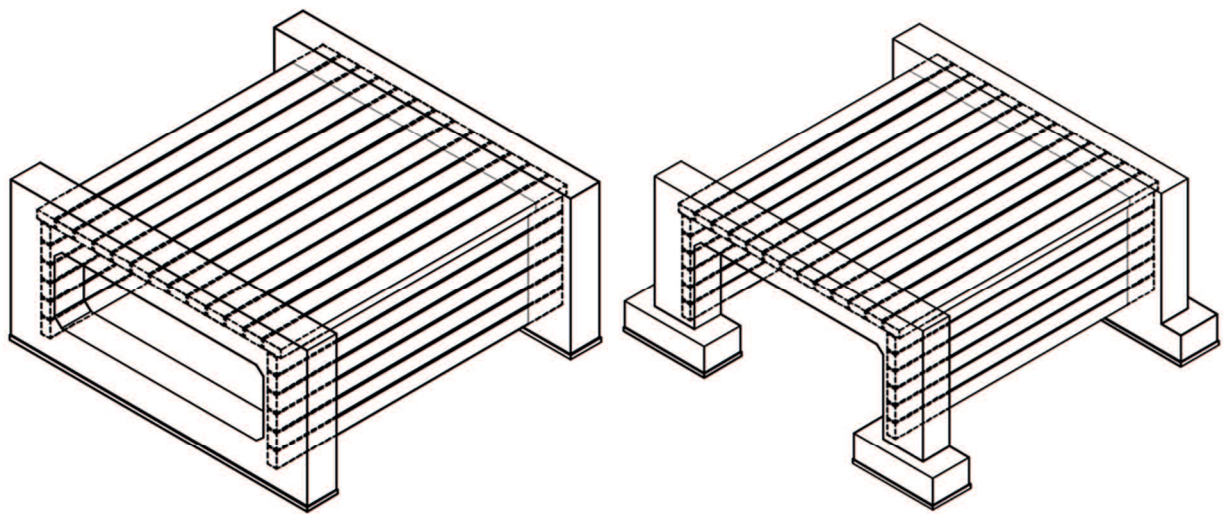


図 1.2.11 URT 工法 主桁・U 形擁壁構造の概要 ¹²⁾

その後，図 1.2.12 に示すように，エレメント端部を巻き込む主桁を支持する構造としてボックスラーメン橋台，門型ラーメン橋台等の構造を採用している．本構造では，線路横断方向の横桁としてエレメントを使用し，その支点は両端部の主桁となるため，アンダーパスの構築延長が長くなると横桁の支間長が長くなることからその構築延長に制約があった．

また，主桁を用いない構造としては，台形のエレメントを用いることでアーチ形状や円形とするトンネル形式として開発当初から適用されている．またボックスカルバート構造としては，1999 年に JR 東日本東京工事事務所が東海道線および東海道新幹線下において，図 1.2.13 に示す敷設したエレメントを貫通する形でボックス断面方向に PC ケーブルを配置し，エレメント内にコンクリートを充填後，作業用エレメントから PC ケーブルを緊張定着することで，PC 構造のボックスカルバートを築造する方法が適用されている．



(a) ボックスラーメン橋台

(b) 門型ラーメン橋台

図 1.2.12 URT 工法 下路桁構造の概要¹²⁾

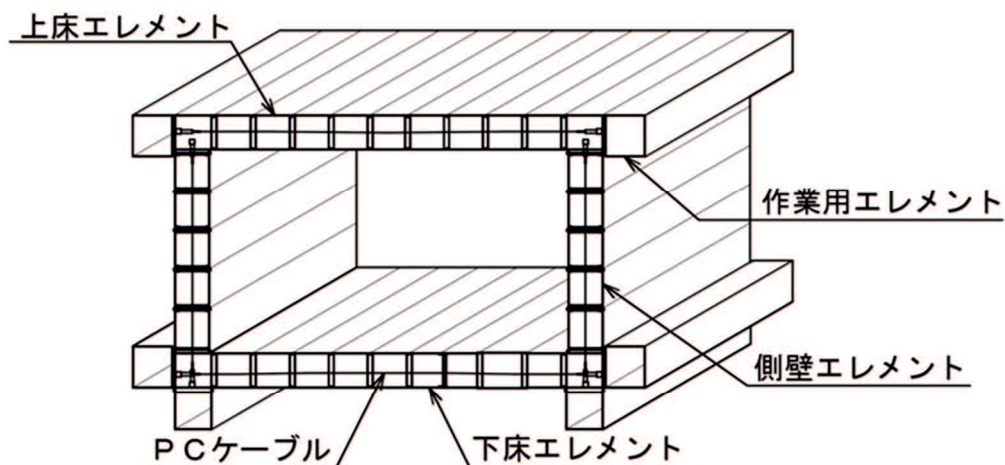


図 1.2.13 URT 工法 ボックス形式構造の概要¹²⁾

(7)PCR 工法

PCR 工法（Prestressed Concrete Roof Method）は、1980 年国鉄仙台鉄道管理局により東北本線下の道路トンネルに初適用されている。PCR 工法はプレキャストコンクリート製のエレメントを発進立坑から機械掘削により推進施工し、これを本体利用することでボックスカルバートを構築する工法である。土質条件により人力施工とする際には PCR エレメントでは内部に作業員が入ることができないため、同形状の仮設鋼管を先行設置し、これと置換する方法とする。

PCR 工法も当初 URT 工法と同様、線路横断方向の横桁としてエレメントを使用し、両立坑で構築した主桁に定着する下路桁形式構造により施工されてきた。この下路桁形式構造には、PCR 桁を支持する主桁と橋台が一体型のラーメン橋台構造と主桁および床版（PCR 桁）からなる上部工とそれを支持する橋台および側壁（PCR 桁）からなる下部工が分離した構造がある。それぞれの構造概要を図 1.2.14、図 1.2.15 に示す。

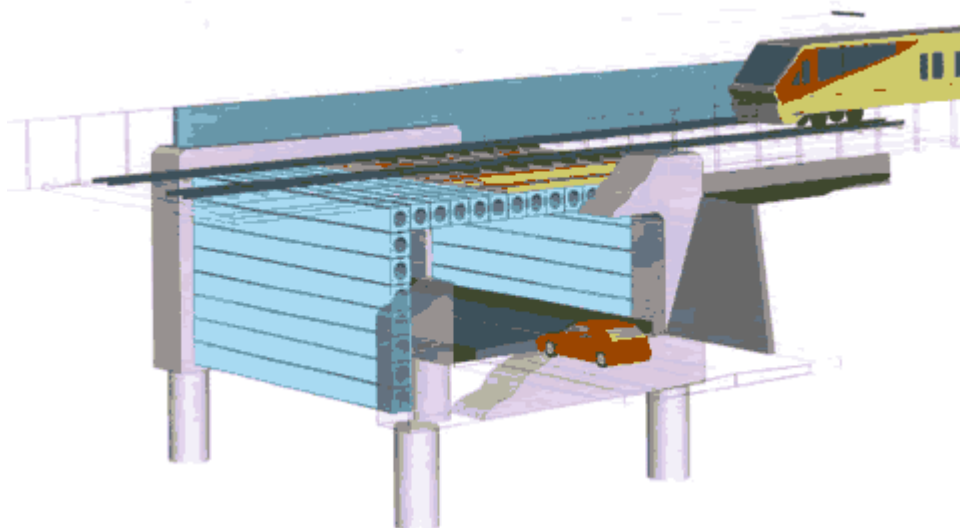


図 1.2.14 PCR 工法 ラーメン橋台形式の概要¹³⁾

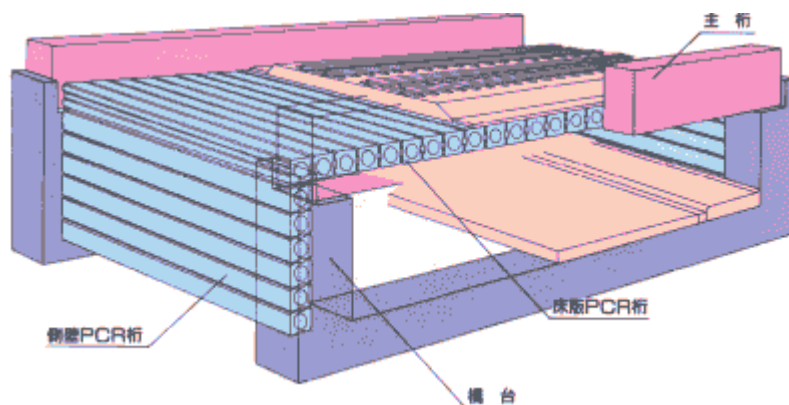


図 1.2.15 PCR 工法 U 形橋台形式の概要¹³⁾

1995 年 JR 東日本東京工事事務所により総武線下で、ボックスカルバート隅角部を作業用エレメントとし、PCR エレメント内を貫通したシングルストランドを緊張・定着する箱形トンネル形式を採用・適用し、その後は図 1.2.16 に示すような PC 構造でボックスカルバートを形成する箱形トンネルが多く実績をあげている。

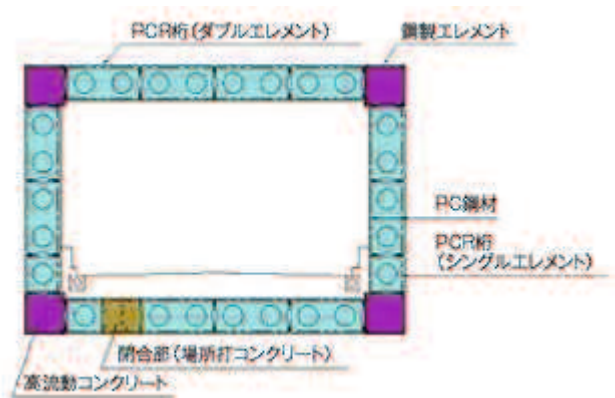


図 1.2.16 PCR 工法 箱形トンネル形式構造の概要¹⁴⁾

(8) HEP&JES 工法

HEP&JES (High speed Element Pull & Jointed Elements Structure) 工法は、URT 工法と同様 4 隅に継手を有する角形鋼管をエレメントとして本体利用する工法として、写真 1.2.4 に示すように 1999 年 JR 東日本千葉支社により内房線下の道路ボックスとして初めて適用された。HEP&JES 工法は、URT 工法のボックスカルバートがエレメント内部に充填されたコンクリートと PC 鋼より線による PC 構造であったのに対し、エレメント同士を連結する継手がエレメントを構成する鋼板の引張力を伝達できる特殊な継手 (JES 継手) を開発・採用することで、ボックスカルバート部材として発生する断面力に対し、エレメント内部の充填コンクリートが圧縮力を、鋼板およびそれを連結する JES 継手が引張力を負担する鋼・コンクリート合成構造 (SC 構造) としているところを特徴としている。

施工手順としては、発進・到達立坑築造後、エレメント同士を継手で連結しながら上部交通直下に敷設し、その後、継手内部に無収縮モルタルを、エレメント内部にコンクリートを充填することで構造体を構築する。



写真 1.2.4 内房線上総湊・竹岡間白狐こ道橋 施工状況 ¹⁵⁾

この工法は、上部交通に与える影響を極力小さくするための小断面のエレメントを本体利用するエレメント推進・けん引工法であること、また構造体を形成するために PC 鋼より線等での緊張作業を必要としないこと、から現状では上部交通の安全性を確保しながら、早く、経済的にアンダーパスを構築できる工法として認められている。

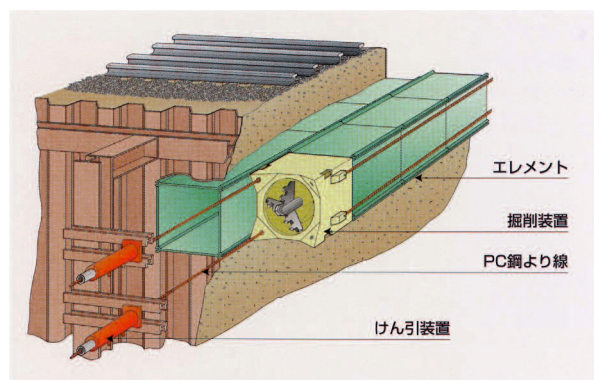


図 1.2.16 HEP&JES 工法概要 ¹⁵⁾

1. 3 非開削工法における既往の研究と課題

従来行われてきた非開削工法において共通するのは、防護工や本体工として小断面のエレメントをけん引・掘進する点である。特に、ボックスカルバートの上床版の位置にあたるエレメントについては、一般的に土かぶり小さく、土質も線路下等においては、盛土や埋め戻し土の場合が多く、支障物となる玉石やコンクリート片等がその中に混在する場合も少なくない。

このような施工条件でエレメントを掘進する際に、重要となるのは、エレメントの設置精度、地表面への影響、けん引・推進力である。これらは、互いに密接な関係を有しており、3つの要素のバランスをとりながら掘進を行うことで、効率的に安全にエレメントの設置が可能となる。以下に、従来行われてきたエレメント掘進に関する研究の概要を示し、その課題を抽出する。

1.3.1 エレメント設置精度

函体けん引工法（BR 工法）では、山下らは、延長 27.8m の工事において函体けん引時の地表面計測により、防護工である箱形ルーフ（エレメント）の施工精度（平面出来形）と横断部地表面の変位に因果関係があることを確認している¹⁶⁾。また、岡野らは、函体推進工法（SC 工法）の工事において、函体推進中の箱形ルーフ、地中、軌道の挙動を計測することにより、山下らが確認した箱型ルーフの施工精度（函体推進直前の設置の状態）が、ほぼその形状を保持したまま函体に押し出される形で到達側へ移動していることを確認した¹⁷⁾。

図 1.3.1 の①に示すように、函体けん引・推進工法（BR・SC 工法）では、上床版部に施工された箱形ルーフの施工精度が最終的には構造物の出来形精度を左右するとともに、函体けん引時の地表面への影響の大小に関わるため、高い精度での箱形ルーフの施工が求められる¹⁸⁾。

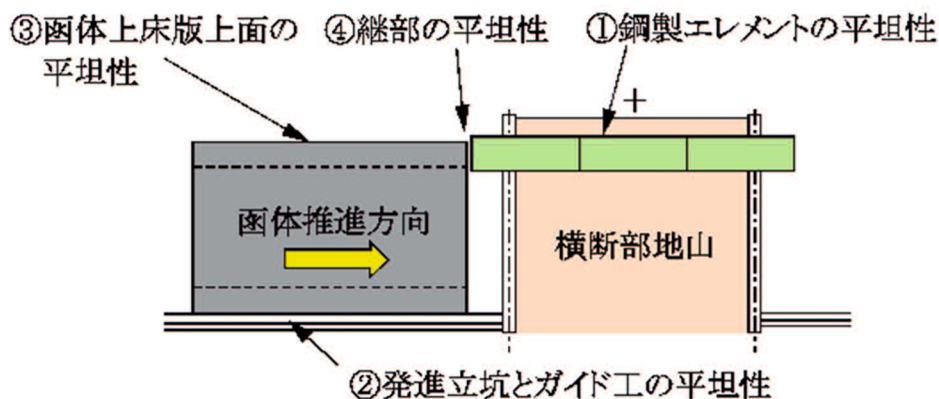
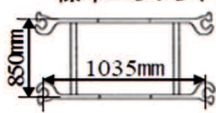
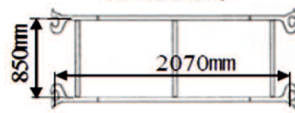


図 1.3.1 函体けん引・推進時の軌道変位要因箇所¹⁸⁾

HEP 工法は、それまで発進立坑側からの元押し施工であったエレメント掘進を、1. 2で示したように到達側から PC 鋼より線を用いてけん引施工することにより、エレメントの施工精度を高めている¹⁹⁾。

また、福本らは、HEP&JES 工法による玉石混じりの砂礫層における上床版の夜間列車間合いでの施工にあたり、工期短縮案として、表 1.3.1 に示すように、標準サイズのほぼ 2 倍の幅を有するエレメント（W エレメント）の採用にあたり、断面幅の拡大時のエレメントのローリングによる施工精度悪化に対する対策として、人力での掘り方調整（ソリ設置等）による防止を行った²⁰⁾。

表 1.3.1 エレメントの変更計画²⁰⁾

	当初計画	変更計画
施 工 方 法	標準エレメント	Wエレメント
	 上床版エレメント本数 基準管:1本 標準管:8本 隅角管:2本 ※上床版掘進は全て牽引 工法(HEP工法)	 上床版エレメント本数 基準管:1本(変更なし) Wエレメント(標準管部):3本 Wエレメント(隅角管部):2本 ※上床版掘進は全て推進工法

W エレメントは人力施工の際の施工速度向上対策としては有効であるが，片側が継手でかん合された状態での掘進となるため，ローリングを生じやすく，施工精度の確保に苦慮している。

1.3.2 地表面への影響

まず，パイプルーフの施工については，柳は，アースオーガーによる排土方式による圧入施工について，その推進に伴う鋼管表面摩擦抵抗と継手の摩擦抵抗が非常に大きく，鋼管径が大きくなると，圧入に必要な反力設備等の仮設工が占める工事費が莫大に増加すること，また摩擦低減のために図 1.3.2 に示すようなフリクションカッターと拡大ビットを用いて余掘り掘削を行っているが，この余掘りによる空洞は設計上考慮されておらず，土かぶりが小さい場合，地表面沈下を引き起こす可能性があることを指摘している²¹⁾。

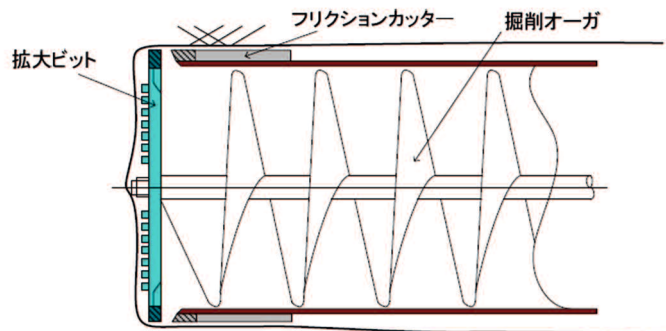


図 1.3.2 余掘り掘削に使われるフリクションカッターと拡大ビット²¹⁾

前述の福本らは，W エレメントの採用での断面拡大による軌道・路盤変状リスクに対して，簡易工事桁による軌道剛性の向上や即日裏込め注入の実施，基準エレメント両側の同時掘進による軌道・路盤変状リスク対策として，エレメント切羽を延長方向に 2m 以上ずらして施工するなどにより軌道への大きな影響なく施工を完了した。地表面影響は，基準エレメント直上の線間部での路盤沈下は最大で 23mm と事前に Jeffery の 2 極座標系による沈下計算式より推定した沈下量 (36.9mm) の 62%程度に抑制できたが，隅角部エレメント部で最大 35mm 沈下しており，推定値 33.6mm の 104%となっている²⁰⁾。

このように，エレメント周囲の余掘りや切羽を開放することによる地盤のゆるみが，地表面に沈下影響を与えることが多くの例で示されている。

また、HEP&JES 工法による上床版の施工においては、オーガータイプの掘削機の掘削中の土砂が十分に排出されない状態で、掘削機での推進を続けたことにより、事前に改良していた路盤のうち、強度が不均一になっていた部分を押し上げたことによる軌道変状が報告されている²²⁾。このように、十分に排土がなされていない状況で掘進した場合や、前方に支障物等があった場合、前方地盤を押し上げることによる地表面の隆起現象へのリスクを排除できない場合がある。

1.3.3 推進・けん引力

竹下は、図 1.3.3 に示す掘削機を用いた URT 工法における推力を、その施工実績より、純先端抵抗、純周辺抵抗、掘削設備の固有抵抗の和からなること、純先端抵抗および固有抵抗は、掘進中一定値であり、純周辺抵抗は掘進距離に比例すること、また純先端抵抗および純周辺抵抗はオランダ式二重管コーンによる地盤の強度 q_{DC} による関数から求められることを示している²³⁾。

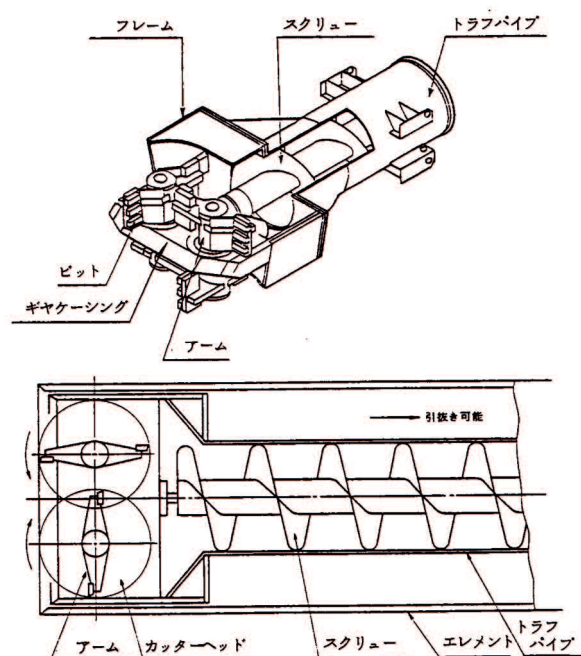


図 1.3.3 URT 工法で用いられる掘削機²³⁾

また、同じく竹下は、同じ URT 工法について推力の低減対策としては、

a) 先掘り工法

マシンケーシングより掘削機先端をわずかに先に出して掘進する方法

b) フリクションカッター工法

マシンケーシングの断面積を後続のエレメントよりわずかに大きくすることで余掘りを確保する方法

c) 滑材を用いる工法

エレメント周面に滑材としてベントナイト等を注入し、摩擦低減を図る方法について、この効果を検証している²⁴⁾。

HEP 工法においても、開発当初、図 1.3.4 に示すように、土被り 1m、延長 28m の区間で実物大の□850mm×850mm の基準エレメント 1 列、一般部エレメント（コの字形状）2 列のけん引掘進試験を写真 1.3.1 に示す掘削機を用いて行い、JES 継手をかん合させない基準エレメントのけん引力と継手をかん合させながら掘進する一般部エレメントのけん引力の違いから JES 継手のかん合抵抗が無視できないことを示している²⁵⁾。また、文献 15)では、同試験結果より、JES 継手の単位長さ当たりの継手かん合抵抗は、21.4～31.4kN/m としている。

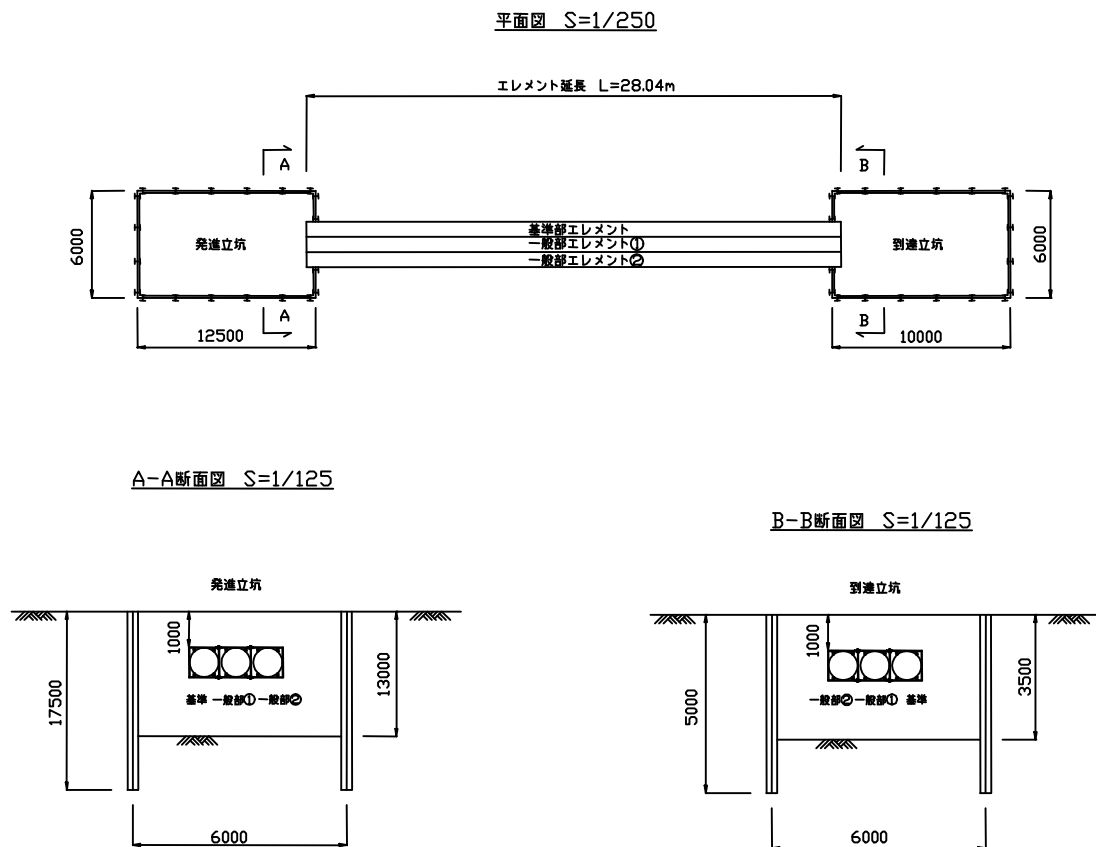


図 1.3.4 HEP&JES 工法試験計画図¹⁵⁾



写真 1.3.1 HEP&JES 工法掘削機および油圧ユニット¹⁵⁾

日下部らは、東海道新幹線と横須賀線が並走している盛土直下での $L=28.8\text{m}$ の施工において、オーガータイプの掘削機および人力掘進それぞれでのけん引力について、機械掘削では文献 15) に示した値とほぼ同等値であったが、人力掘削では刃口先端抵抗が低い値となったこと、またシルト層では周面摩擦抵抗も小さい値となり、総けん引力が計画値の 67%程度であったことを報告している²⁶⁾。

エレメントの掘進時の推進・けん引力については、刃口先端抵抗と周面摩擦抵抗および継手のかん合抵抗の和で示される。周面摩擦低減対策としては、フリクションカッターや滑材を用いる方法が有効である。

また、柳や竹下、日下部が示すように、推進・けん引力が正しく算定されることにより、仮設備の軽減を図ることが可能となる。

1. 4 非開削工法における問題点と本研究の目的

1. 3で示したように、エレメントの設置精度、地表面への影響、およびけん引・推進力に関する多くの研究がなされてきた。しかし、小さな土かぶりでも小断面のエレメントを掘進するにあたって、より効率的に、安全性を高めて施工を行うためには、それぞれの工法の有する課題を解決する必要があるものと考えられる。

まず、エレメントの設置精度については、図 1.4.1～1.4.2 に示すような元押し推進型の掘進設備では、細やかな方向修正は困難であり、精度の確保に労を要する。

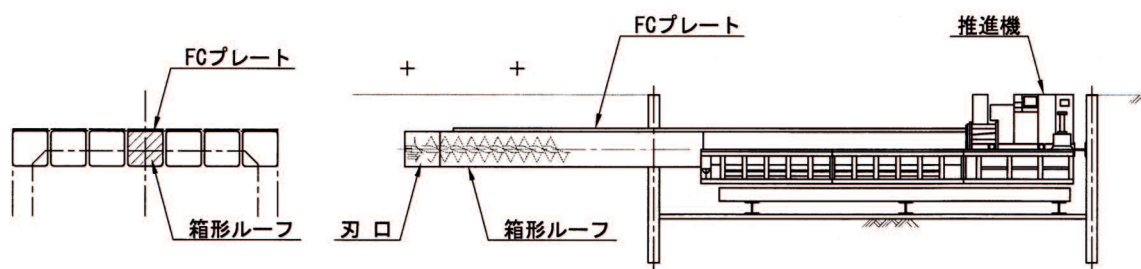


図 1.4.1 箱形ルーフ推進工（機械施工）⁹⁾

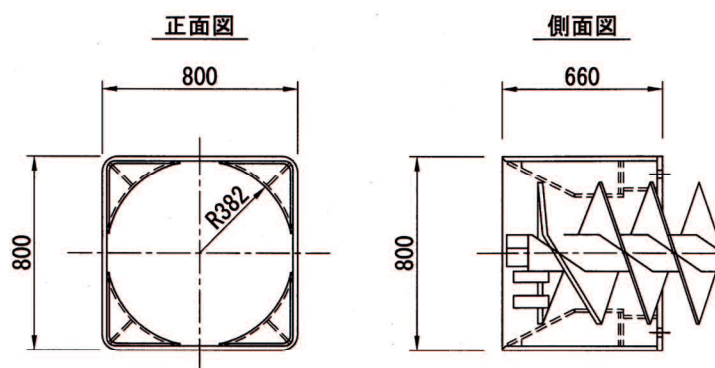


図 1.4.2 箱形ルーフ推進用刃口（機械施工）⁹⁾

到達側からけん引する HEP 工法においても、機械施工の場合、計画位置からけん引することにより、最終的な到達位置の誤差は小さくできるが、掘進途中での方向修正は困難である。また、機械掘削では、先端部を切羽に押し付ける形での掘削となるため、掘進時の先端抵抗が大きくなり、総推進・けん引力の増大につながるるとともに、前方圧力を高めることで、地表面変位への影響が大きくなることが懸念される。

一方、人力掘削については、元押し施工、けん引施工に関わらず内部に掘削作業員が入っての施工となるため、こまめな方向修正は可能である。しかし、施工速度が機械施工に比べ、格段に落ちることや、切羽を全面開放することによる前方地盤のゆるみにより、崩壊や沈下による地表面変位への影響が懸念される。

地表面影響に関しては、切羽やエレメント周面の開放や余掘りをできるだけ小さくすることが、沈下低減につながるることとなる。しかし、前述のように、機械掘削の先端部を切羽に押し付けたら、エレメント周面の余掘りを最小限とした場合、推進・けん引力の増大により、反力設備等の仮設工が莫大となる。さらに、先端抵抗や周面摩擦抵抗に対し、地盤に十分な耐力がない場合、隆起等の変状が発生することが懸念される。

また、軌道や道路の下に計画されるアンダーパスにおいて、土かぶりの小さな箇所には、原地盤であっても、過去の新設、改築、改変等の際に残された、玉石やコンクリート塊や基礎等の支障物が存在することも多く、これらは記録も残されておらず、事前の把握は困難である。小断面のエレメント施工では、図 1.4.3 のような状況で発生する、これらの支障物の刃口による押し上げや、支障物撤去した際のエレメント周囲に発生する空隙による地表面影響が大きな課題であった。

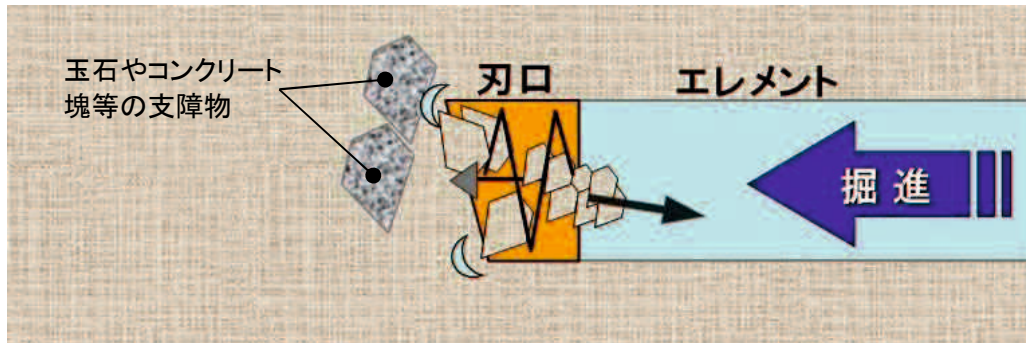


図 1.4.3 エレメント掘進時発生する支障物の状況イメージ

このような課題から、各鉄道事業者では、1m 程度と土かぶりの小さな上床版の施工については、夜間等の列車の立ち入り制限した時間帯（線路閉鎖間合い）や、列車間合いでの施工に限定する等の対策をとって、安全性を担保していることが多い。しかし、これは工期や工事費の増大を招く原因となっていることも事実である。

今後も、交通の過密化により、ますます需要の高まりが予想される非開削工法において、従来から懸念されてきた課題に対し、上部交通に影響を与えない、より効率的で安全性の高い工法が求められている。そこで本研究の目的を以下のように定め、既往の開発・研究をベースとして、さらなる HEP&JES 工法の改良を行い、地表面への影響を低減し、精度良くアンダーパスを構築する工法を開発することとし、実大の施工試験を繰り返し、実施工によりその開発効果の検証を

行うこととした。

本研究により開発する工法的目標性能は、以下の通りとした。

- a) 構造物の必要内空を確実に確保できるエレメント設置精度を有すること。
- b) エレメント周囲の余掘りを最小限とし、地表面への影響を極力小さくすること。
- c) 必要なエレメントけん引力を極力小さくし、簡易な設備での施工を可能とすること。
- d) 土かぶりの小さな箇所での出現の可能性の高い、玉石やコンクリート塊や残置された基礎等の支障物による施工不能や、押し込みや除去後の空洞による地表面影響を発生させない施工法とすること。

1. 5 本論文の構成

本論文を構成する第2章～第6章の内容を以下に概述する。

本論文は6章からなる。第2章は、HEP&JES工法の改良工法である本開発工法に関して、その初期段階で行った実験内容について記述した章である。開発工法は、エレメント先端の刃口上面に沿って、切削ワイヤーで土中に溝を形成し、そこに刃口の先行ルーフ部の鋼板を挿入していくことで、切羽上部の地盤のゆるみを抑制し、また土中に挿入された先行ルーフが切羽面の安定に寄与することを示した。また、このような非開削工法は土被りの小さい施工条件下で適用されることが多く、人工的な残置物がエレメントの掘進に支障する場合も多い。開発工法は、切削ワイヤーにより計画断面の外周に沿って、これらの支障物を切削し、刃口内から撤去することが可能であるため、エレメントの掘進に支障することはない。

初期段階で行った実験は、2つのステップからなる。第1のステップは、切削ワイヤーが地盤を切削する能力を有するかどうかを確認する地盤切削ワイヤーの性能確認試験である。使用したワイヤーは、従来からコンクリート構造物の切削に用いられているもののうち、ワイヤーの冷却などに水を使用しない、いわゆる無水切削ワイヤーである。この試験により、採用した切削ワイヤーは模擬地盤および地盤中の支障物を十分に切削するに足る能力を有していることを確認している。

第2のステップは実物大のエレメントの掘進実証試験である。この試験では、地盤切削機構を組み込んだ刃口構造を設計して製作した。つぎに、20mの模擬地盤を作成し、JES構造物を構築する際の最初に施工する基準エレメントと、その後に施工上のガイドとなる継手（JES継手）をかん合させながら掘進する一般部エレメントの2種類のエレメントについて、それぞれ地盤切削を併用した掘進試験を実施した。この試験の結果、本切削機構の実用性を確認するとともに、刃口構造や、掘進精度管理について、再検討が必要であることなどを確認した。

第3章は、前述の実証試験から得られた課題に対する改良、および再度実施した実証試験について記述している。まず、地盤切削機構を有する刃口構造の変更を行い、再設計および再製作を行った。また、前回の実証試験で確認されたローリングが増大する現象に対し、その解消のために刃口構造の改良を行っている。

これらの改良の効果を検証するために、掘進距離 $L=20\text{m}$ の実証試験を実施した。試験は2回実施し、どちらの試験も JES 継手をかん合させながら掘進する試験とした。結果として、改良した刃口構造について耐久性の向上が図れたこと、刃口の姿勢の計測とテーパー部の掘削方法を組み

合わせることで、ローリングの抑制を図ることができ、刃口の姿勢の制御方法が明らかになった。

第4章は、開発工法を全面的に適用した工事の施工結果について述べた章である。工事は供用中の鉄道下に土被り1.4mで交差するアンダーパスを構築するものである。このアンダーパスは、横幅49m、高さ8.9m、延長14mの道路構造物であり、その上床版部分の20エレメントに開発工法を採用した。従来工法では夜間の線路閉鎖時間のみの施工となることから、施工期間が10ヶ月程度必要になる計画であったが、開発工法を用いることにより、軌道への影響リスクが低減できることから昼夜の連続施工とし、結果として、約5ヶ月で施工を完了した。この施工において、開発工法の地盤切削機構が、実施工に対して十分な施工性、耐久性を有していること、優れたエレメント設置精度を確保できること、地表面への影響が小さいこと、けん引力を従来の工法に比べて小さくできることを検証している。

第5章は、開発工法の実工事への適用にあたって、施工計画策定時に検討すべき項目について述べた章である。本項は、新たな知見を示すものではないが、開発工法の実施工への適用にあたり、その安全性や経済性を検証する際に実施した検討項目であり、工法の適用範囲を明らかにするとともに、施工コストを勘案した標準的なエレメント寸法等について記述している。

第6章は結論であり、本研究により得られた知見および今後の課題などを述べている。

第2章 新しいエレメント掘進工法の開発

2. 1 概 要

2.1.1 従来工法における課題

筆者らが、開発を担当した HEP&JES 工法を始めとするエレメント工法ならびに、函体推進/けん引工法での防護工としての箱型ルーフやパイプルーフの機械施工では、その施工精度や地表面影響に対して課題があること、一方、人力施工の場合には、切羽前方の状況は掘削作業員が直接、目視により確認できる反面、切羽の開放面が大きくなることに対する安定性の確保や、機械施工に対して、施工速度の低下による工程延伸等が課題であった。

特に、図 2.1.1、写真 2.1.1 に示すような、土かぶりの小さい上床版部のエレメント掘進については、機械掘削、人力掘削いずれの施工によっても、列車の運行に対する影響リスクが懸念されることから、夜間の線路閉鎖間合い時間等に施工時間が制約されることが多く、工期や工事費の増大の原因となっていた。逆に、上床版部のエレメントを設置することにより、これを防護工として、側壁以降のエレメントは機械掘削等、施工速度の速い工法で昼間施工を行うことが可能である。

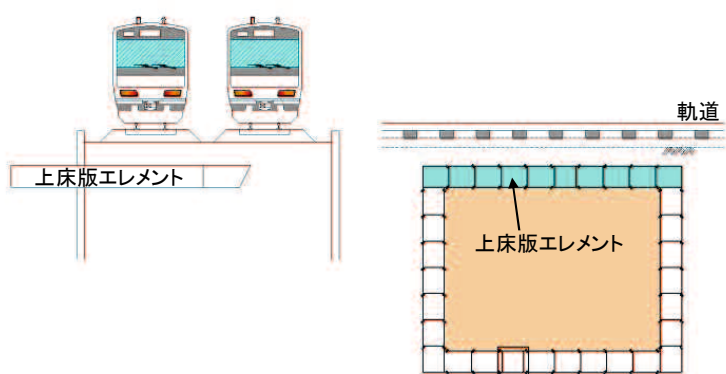


図 2.1.1 上床版エレメントの位置図

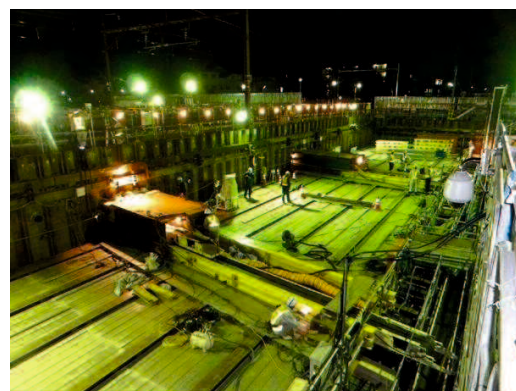


写真 2.1.1 上床版エレメントの施工状況

2.1.2 地盤切削を併用したエレメント掘進工法²⁷⁾

そこで、上床版のエレメント掘進に特化した工法として、地盤を切削しながら人力掘削により掘進することで、切羽の安定を確保しながら、支障物への対応も可能とし、結果的に地表面変位を抑制する新しいエレメント掘進工法（以下、開発工法とする）を考案した。

開発工法は、図 2.1.2 に示すように、刃口前方上面に設置した地盤切削ワイヤーにより、支障物等が混在する地盤を切削しながら刃口上面の先行ルーフを切削溝に挿入しながら掘進を行う。

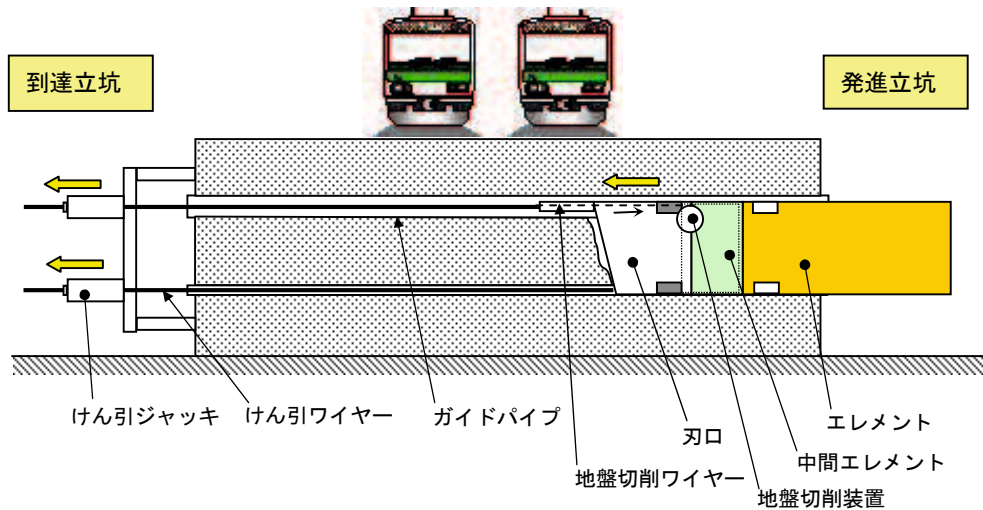


図 2.1.2 開発工法の概要

図 2.1.3 に示す地盤切削刃口部に装備されたワイヤー機構は、刃口前方の地盤切削部分（写真 2.1.2）とエレメント掘進に先行して設置したガイドパイプ（塩ビ管 $\phi 300\text{mm}$ ）内を通るプーリー群ならびに刃口内部に設置した油圧モーター式の駆動プーリー群により構成される。

従来エレメント掘進工法におけるエレメントサイズは、高さ、幅ともに $1,000\text{mm}$ 程度を標準としていた。これは、カッターヘッド式の掘削装置の場合、掘削断面が円形となるため、正方形に近い形状とし、掘削効率を高めることによる。これに対し開発工法では、エレメント幅を $2,000\text{mm}$ 強とし、人力掘削時の刃口内部での作業性向上を図ること、かつ機械掘削に対する施工速度の低下をエレメント挿入本数を減ずることにより補完しようとしたものである。図 2.1.4 にエレメント配置の比較を示す。また、エレメント幅を大きくすることにより、刃口後方に地盤切削ワイヤーの駆動装置と排土設備（ベルトコンベア）を並設することを可能とした。

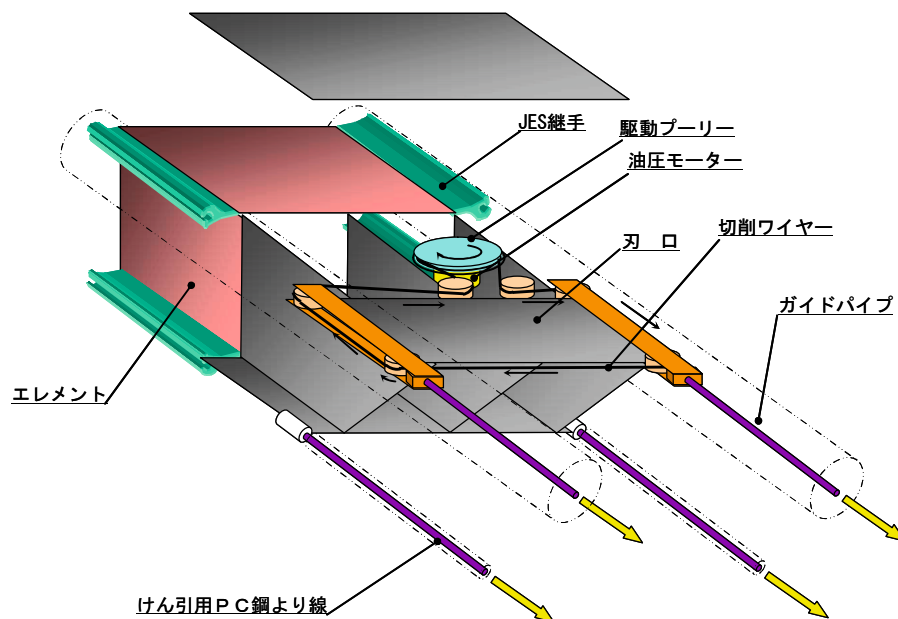


図 2.1.3 地盤切削刃口概要図

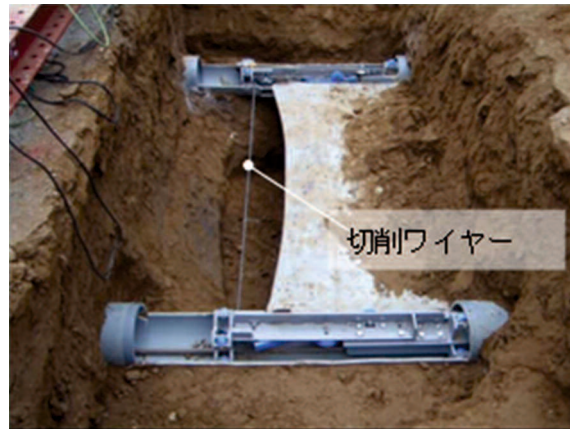


写真 2.1.2 刃口先端部ワイヤー位置

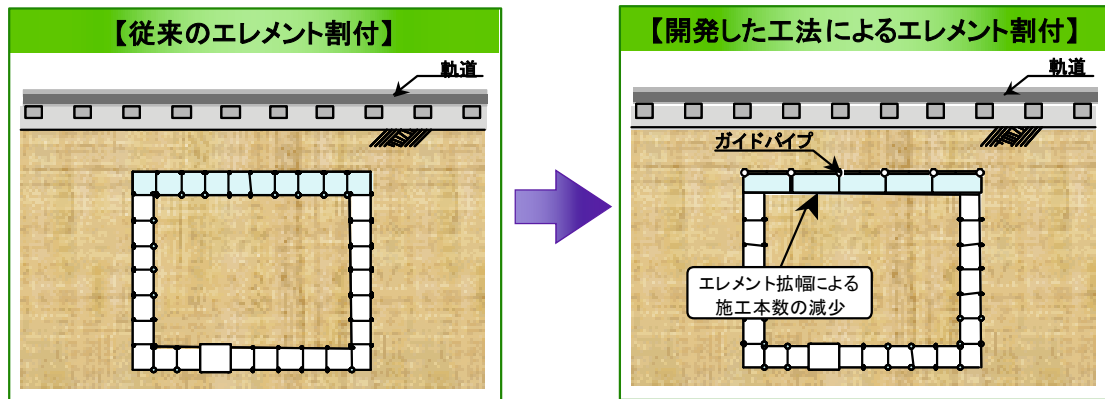


図 2.1.4 線路下横断工におけるエレメント配置の比較

2. 2 地盤切削ワイヤー性能確認試験

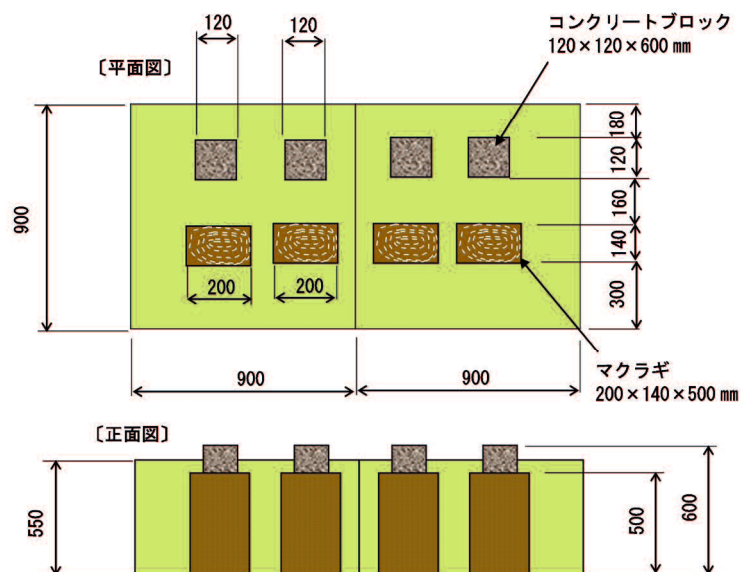
2.2.1 試験目的

従来のワイヤーソー工法において、主にコンクリート構造物等を切断する場合、一般的にワイヤーの冷却とワイヤーへの付着物の除去を目的に、高圧水等を使用することが多い。しかし、今回のように地盤を切削することを目的とする場合、水の使用は地盤切削箇所の地盤への水分の供給による地山の緩みや安定性の低下が懸念された。

そこで、今回は無水切削ワイヤーソー²⁸⁾の採用を検討した。このワイヤーの切削性能、耐久性等を検証することを目的として、支障物を含んだ模擬地盤を作成し、切削確認試験を実施した。

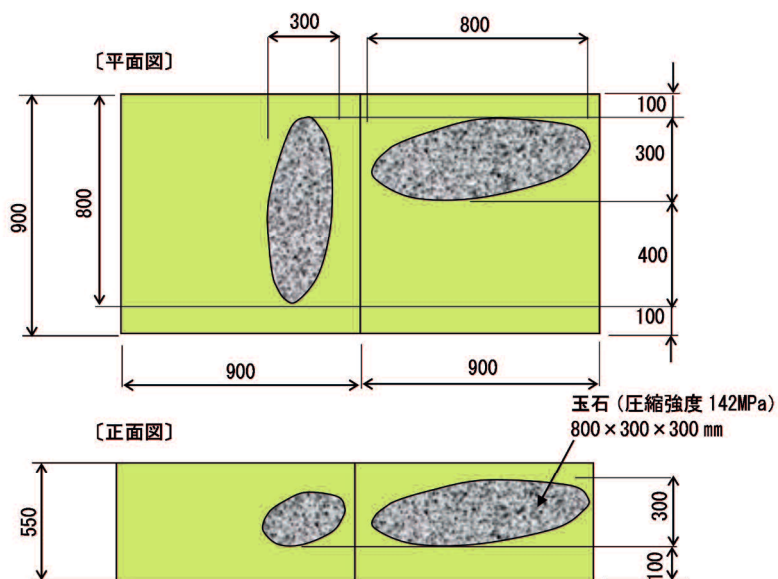
2.2.2 試験概要

模擬地盤の形状や支障物の配置状況を図 2.2.1、図 2.2.2 に示す。模擬地盤は流動化処理土中に、支障物を模したコンクリートブロック、マクラギあるいは玉石を配置した。流動化処理土の強度は一軸圧縮強度 0.87N/mm^2 とした。



(a)コンクリートブロックおよびマクラギを配置したもの

図 2.2.1 模擬地盤概要図 (その 1)



(b)玉石を配置したもの

図 2.2.2 模擬地盤概要図 (その 2)

1 回の切削幅は、開発工法のエレメント幅から決定される 1,800mm、切削延長は 900mm とし、実施工を模擬してガイドパイプである塩ビ管も同時に切削していくこととした。試験は、通常のコンクリート切断に用いるワイヤーソー設備に無水ワイヤーを装備し、模擬地盤の両側に配置したプーリーを 100mm ずつ前方に移動させ、その間の模擬地盤をほぼワイヤーが直線状となるまで切削し、その切削に要する時間を測定した。性能確認試験の概要を図 2.2.3 に示す。

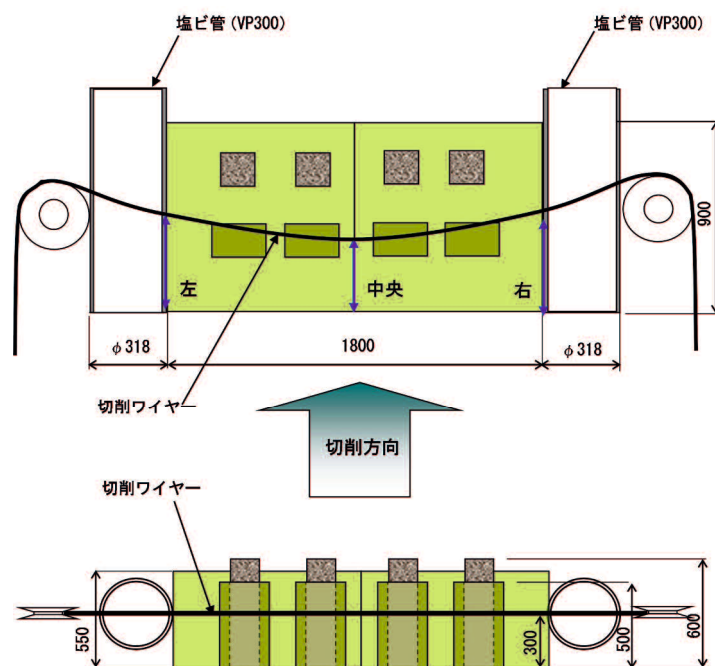


図 2.2.3 ワイヤー性能確認試験概要図

性能確認試験の実施状況を写真 2.2.1～2.2.4 に示す.



写真 2.2.1 無水ワイヤーソーシステム



写真 2.2.2 切削状況（切削開始直後）



写真 2.2.3 ガイドパイプ切削状況



写真 2.2.4 切削状況（切削終了直前）

2.2.3 試験結果

2つの模擬地盤での切削試験において、それぞれ対象した支障物および支障物のない箇所を切削するのに要した時間を集計し、対象物毎の平均切削速度を算出した。表 2.2.1、図 2.2.4 に切削対象毎の切削速度の違いを示す。また、写真 2.2.5、2.2.6 にそれぞれの模擬地盤の切削面の状況を示す。

表 2.2.1 切削対象別の切削速度

切削対象	切削距離 (mm)	切削時間 (min)	平均速度 (mm/min)	切削効率 (%)
支障物なし	840	62	13.5	100 として
枕 木	140	25	5.6	41
コンクリート	120	9	13.3	99
玉 石×1	400	42	9.5	70
玉 石×2	300	41	7.3	54

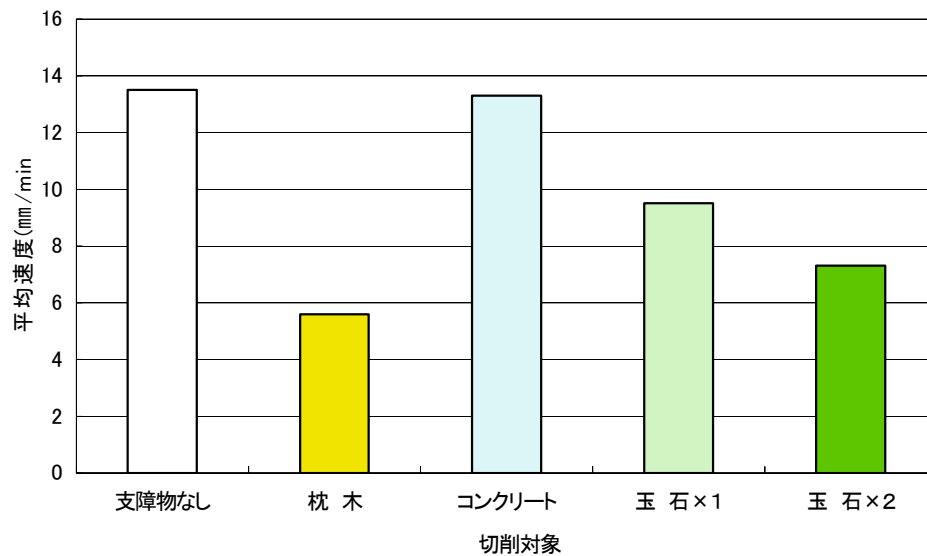


図 2.2.4 切削対象別の切削速度

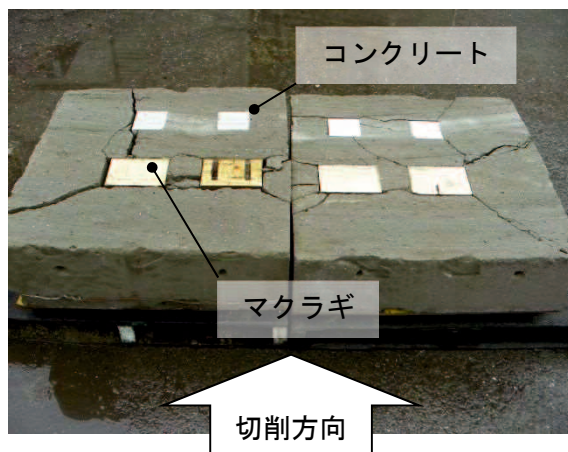


写真 2.2.5 切削面の状況（マクラギ，コンクリート）

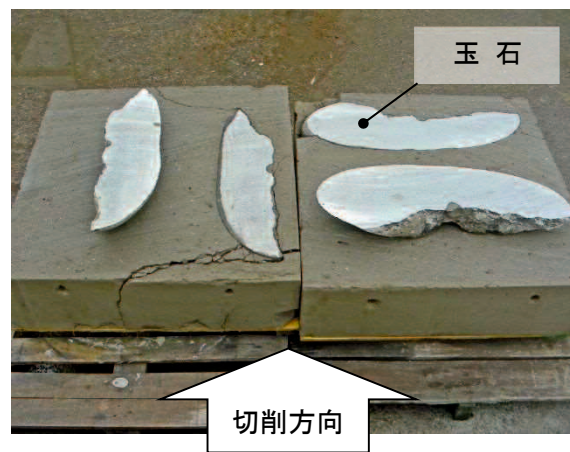


写真 2.2.6 切削面の状況（玉石）

ワイヤー性能確認試験結果から、以下の点を確認した。

- a) 無水ワイヤーは、模擬地盤、支障物およびガイドパイプを切削する性能を有していることを確認した。
- b) 模擬地盤部および支障物の境界部においても、切削面は平滑であり、刃先先端の貫入時に支障となる突起や凹凸は見られなかった。
- c) 切削速度は、模擬地盤部が 13.5mm/min、マクラギ部が 5.6mm/min、コンクリート部が 13.3mm/min、玉石（1 箇所）が 9.5mm/min、玉石（2 箇所）が 7.3mm/min となり、支障物の切削による速度低下が認められた。

2. 3 実証試験 I ²⁹⁾

2.3.1 実証試験用刃口の製作

実証試験 I を実施するにあたり、実大の幅 2,400mm のエレメントを掘進するための地盤切削ワイヤー機構を搭載する刃口を設計・製作した。この際に検討した項目を以下に列記する。

- a) ワイヤーの切削位置は、刃口上面先行ルーフと同一線上とする。
- b) ガイドパイプ内から刃口内部へスムーズな導線を確保する。
- c) 掘削作業員の配置を考慮したワイヤーの取り回しとする。
- d) 地盤切削ワイヤーの駆動装置を刃口内に収納する。
- e) ワイヤーの繰り返し曲げによる疲労破断を考慮し、プーリー数は極力少なくする

これらの項目を満足するよう、刃口設計を行った。実証試験 I は、HEP&JES 工法における 1 本目に施工する基準エレメントおよび、JES 継手をかん合させながら追従して施工する一般部エレメントの 2 エレメントについて実施するため、試験用刃口についても、その 2 種類を設計・製作した。

地盤切削ワイヤーの駆動装置を刃口内部に収納するにあたり、容積の小さい油圧モーターを選定し、プーリーにより刃口内部および先端の地盤切削部へとワイヤーを取り回し、ワイヤー端部はカシメと呼ばれる金属管で圧着する方式とした。

実証試験時に設計した刃口形状として、図 2.3.1 に基準エレメント用刃口を、図 2.3.2 に地盤切削機構の配置図を示す。また、写真 2.3.1、2.3.2 に刃口全景を、写真 2.3.3 にプーリー部を、写真 2.3.4 にワイヤー駆動装置、表 2.3.1 にワイヤー駆動装置仕様、写真 2.3.5 にワイヤー駆動装置油圧モーター、写真 2.3.6 にワイヤーの張力を制御するエアーシリンダー操作盤、写真 2.3.7 に地盤切削ワイヤー、写真 2.3.8 にプーリーを示す。

また、図 2.3.3 にワイヤー駆動装置概要図を、図 2.3.4 にプーリー配置の模式図、図 2.3.5 および表 2.3.2 に駆動用油圧ユニットの仕様を示す。

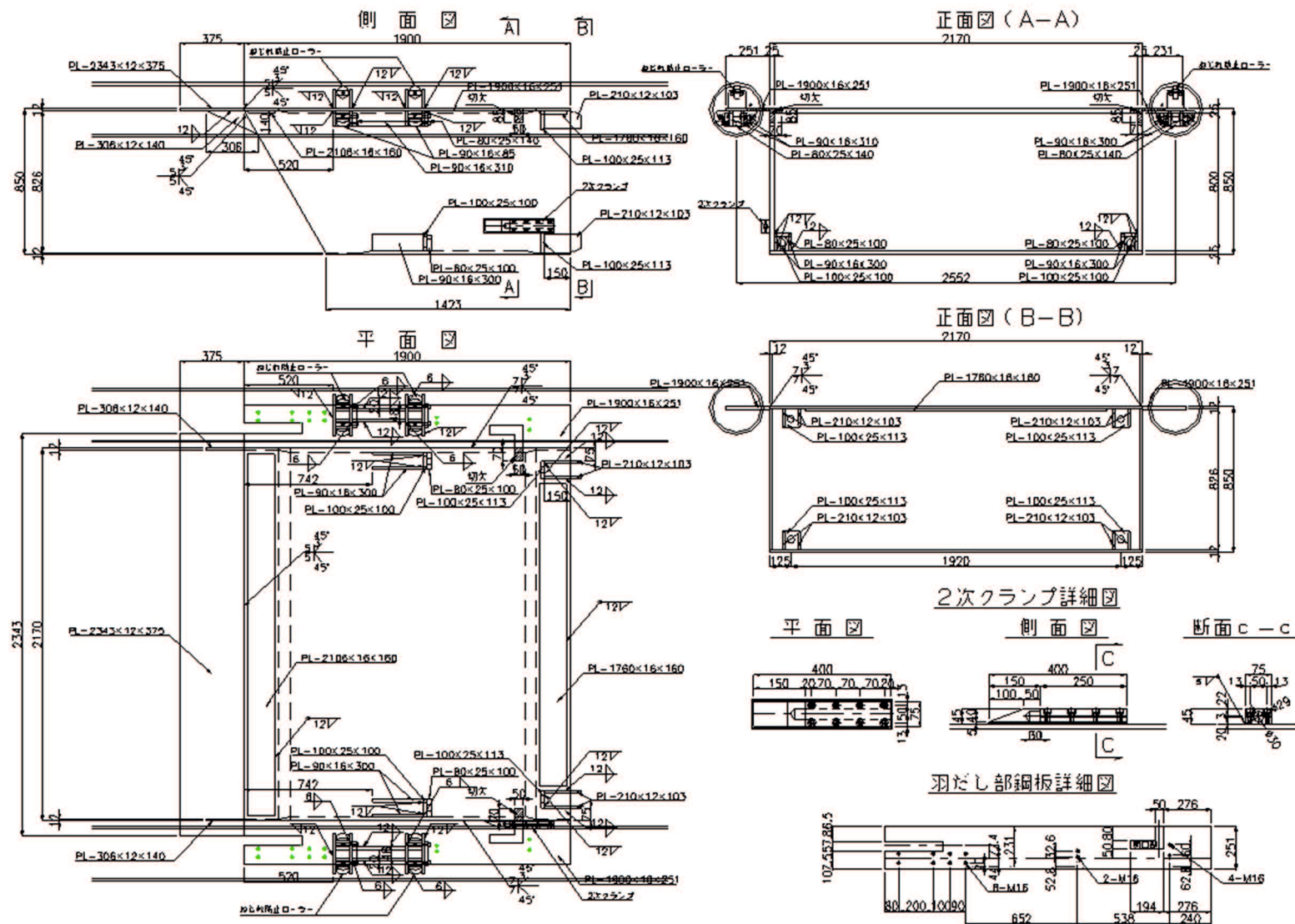


図 2.3.2 実証試験 I 用刃口 地盤切削機構配置図
(基準エレメント)



写真 2.3.1 地盤切削刃口（基準エレメント用）

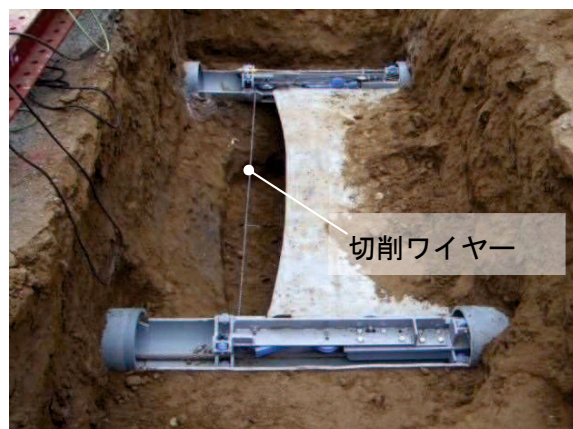


写真 2.3.2 地盤切削刃口（先端プーリー部）

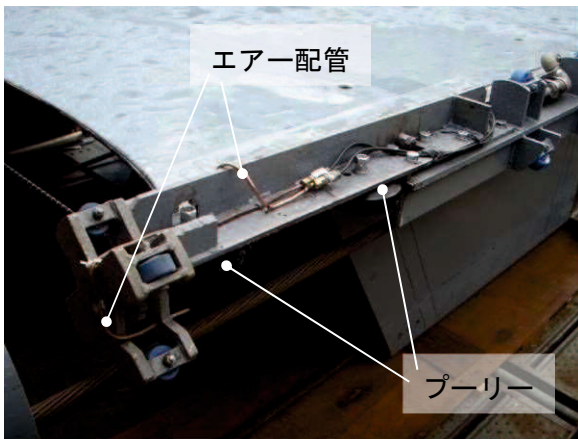


写真 2.3.3 プーリー部分

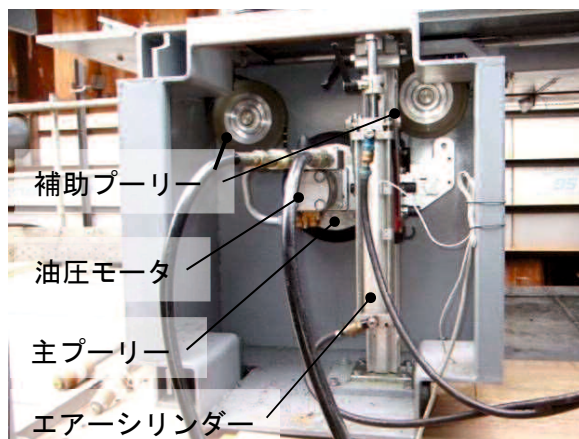


写真 2.3.4 ワイヤード駆動装置

表 2.3.1 ワイヤード駆動装置仕様

メーカー	HILTI
公称出力	最大 17.5kW
油流	最大毎分 50 リットル
油圧	最大 21 MPa
推奨操作圧力	8～12 MPa
メインプーリー	φ280 mm
回転数	1,100rpm （最大 1900rpm）
ワイヤー速度	最大毎秒 27m
エアシリンダー	シリンダー径 φ63 mm、ストローク 230 mm

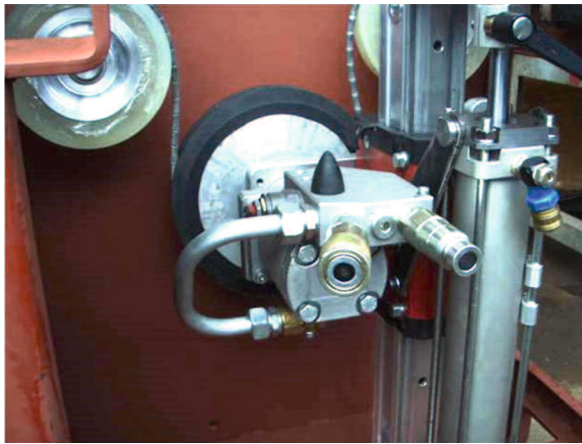


写真 2.3.5 ワイヤ駆動装置油圧モーター



写真 2.3.6 エアーシリンダー操作盤



写真 2.3.7 地盤切削ワイヤー



写真 2.3.8 プーリー (φ120mm)

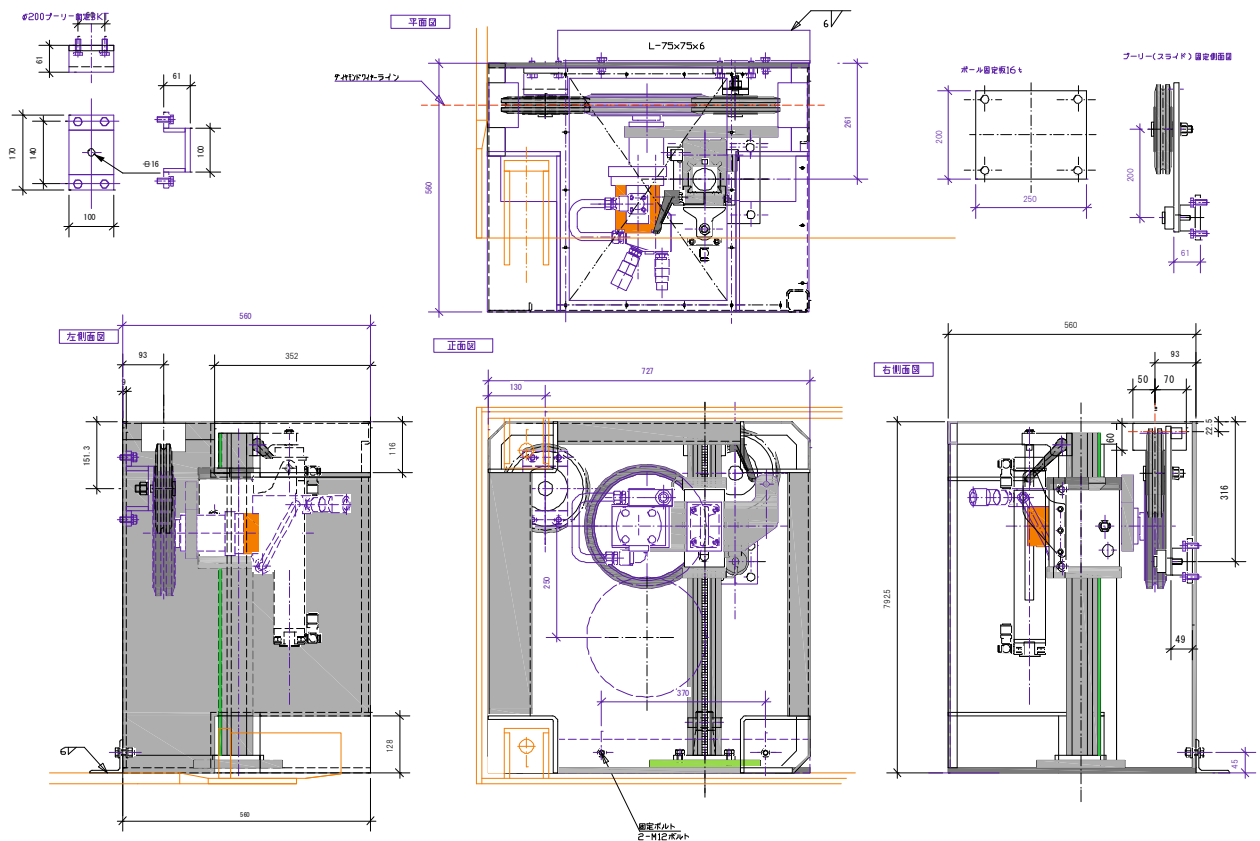


図 2.3.3 地盤切削ワイヤー駆動装置概要図

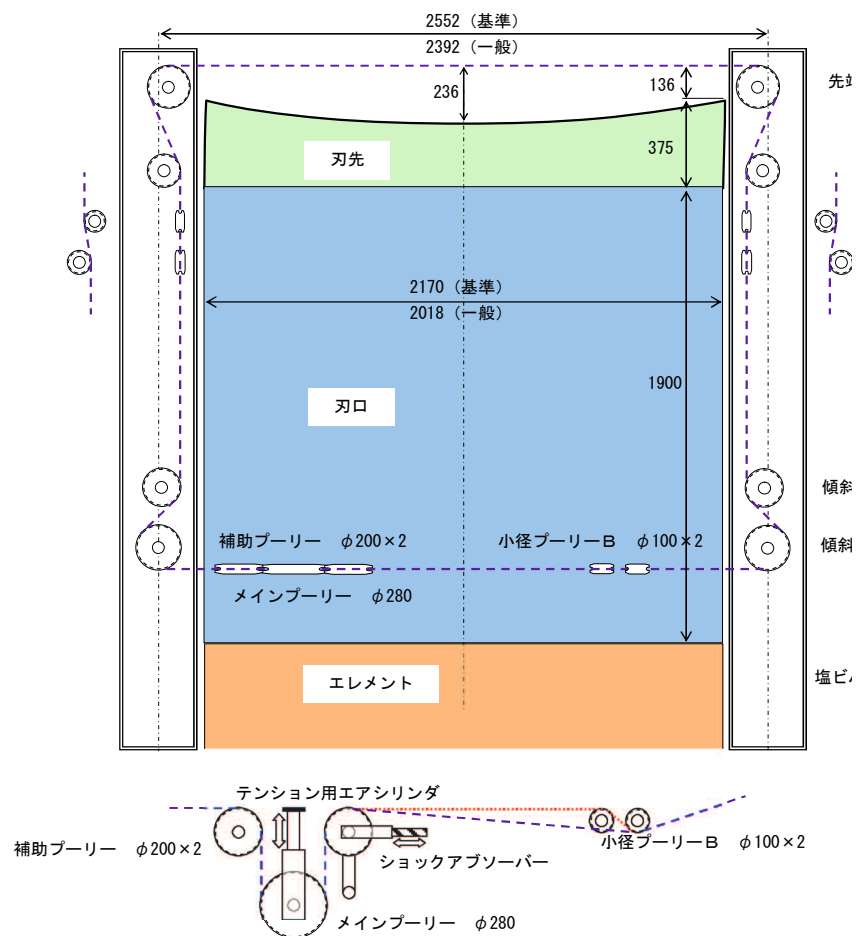


図 2.3.4 地盤切削刃口内プーリー配置図

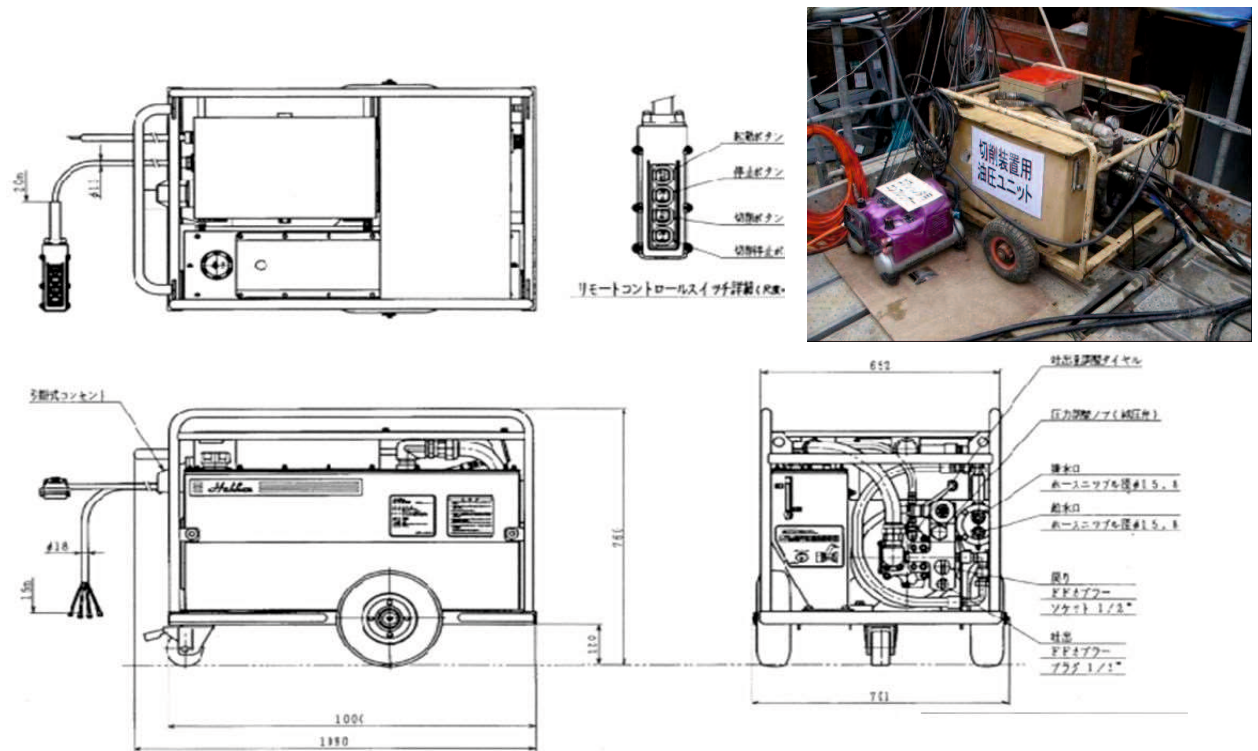


図 2.3.5 地盤切削装置駆動用油圧ユニット

表 2.3.2 地盤切削装置駆動用油圧ユニット仕様表

メーカー		(株)コンセック
型式名		E-1100R
使用電源		三相 200/220V 50/60Hz 50A 以上の商用電源 または 20/25kVA 以上の発電機
電動機		三相誘導電動機 全閉外扇形 11kw 4P
油圧ポンプ名称		可変容量ピストンポンプ
吐出圧力設定	最大	20.6MPa (210 kg f/cm ²)
	工場出荷時	14.0MPa
吐出量	設定範囲	0~40.8ℓ/min (50Hz)
	最大	49ℓ/min
オイルクーラー		水冷式
油圧作動油タンク容量		60ℓ
油圧作動油		鉱物系耐摩耗性油圧作動油 ISO-VG46
寸法 W×L×H		980×1,040×732mm
本体質量		290kg

なお、地盤切削中に地中で地盤切削ワイヤーが切断した場合、ワイヤーを再度プーリーに掛け直して、切断部分を再度カシメにより接続する必要がある。しかし、左右のプーリーはガイドパイプ内に装備されているため、ワイヤーの掛け直しが困難である。

そこで、あらかじめガイドパイプ内のプーリー部分に誘導用のメッセンジャーワイヤー（φ2.5mm程度）を配置しておき、ワイヤーが切断または交換する際には、地盤切削ワイヤーの片端を誘導用のワイヤーに仮固定してプーリーに通すことができる。

なお、地盤切削中に誘導用ワイヤーも一緒に旋回するため、刃口内の左右のワイヤーは保護パイプで防護することとした。

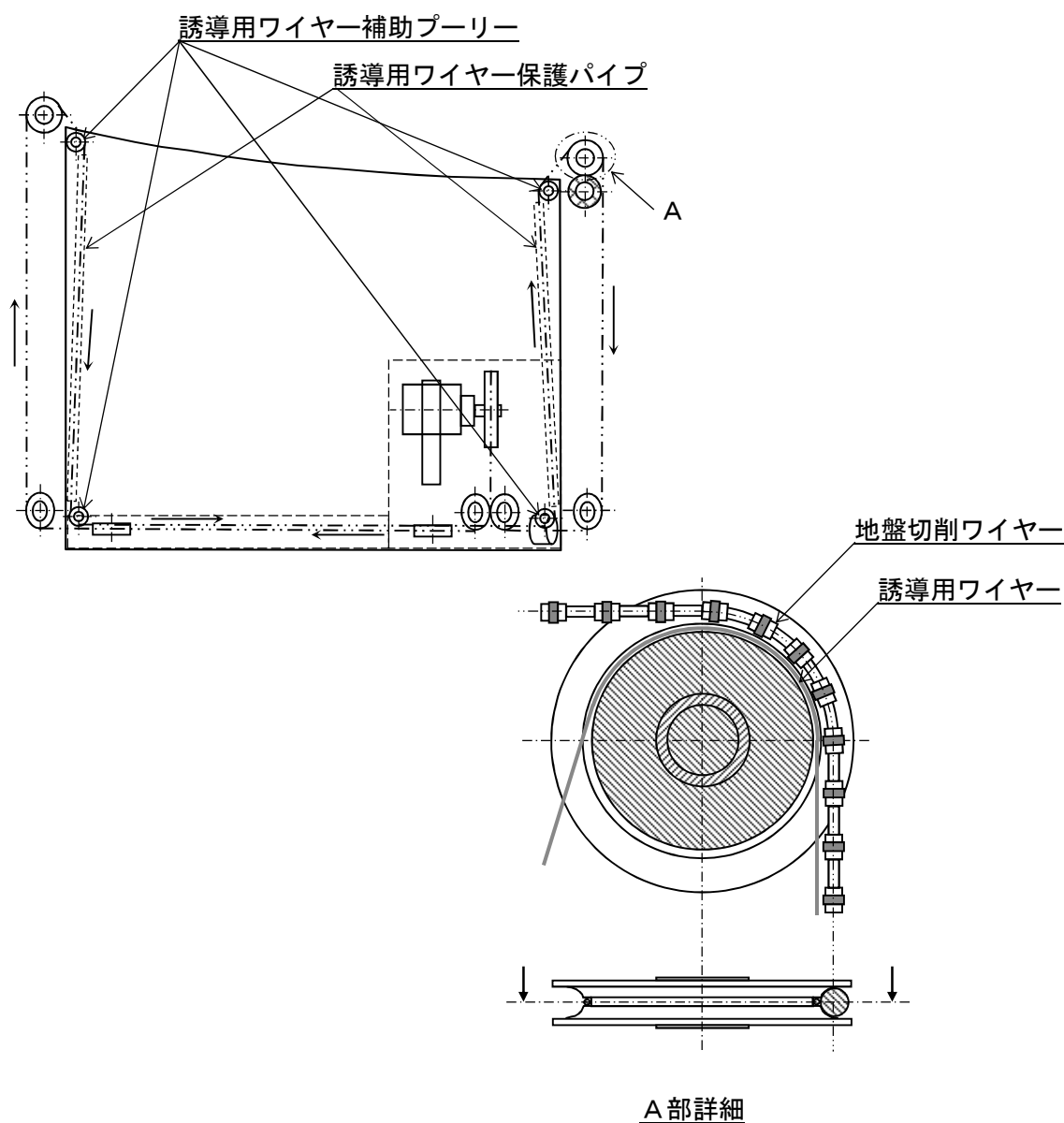


図 2.3.6 誘導用ワイヤー配置図

2.3.2 実証試験 I 概要

2.3.1に示した地盤切削機構を用いて、実物大エレメントの掘進実験を実施した。実験は、千葉県成田市の鉄建建設株式会社建設技術総合センター内の試験ヤードを使用して行った。ここには常設の発進・到達立坑がある。まず、基準エレメントとして1回目の掘進試験を行い、その後、一般部エレメントをJES継手をかん合させながら掘進し、計2回の掘進試験を実施した。1回の掘進延長は、掘削用刃口先端が到達立坑に達しないまでの距離として $L=20.0\text{m}$ とした。図2.3.7および図2.3.8は、試験ヤードの概要を示したものであり、それぞれ平面図、縦断面図である。

開発工法は、既存の工法と同様に一般に土かぶりは小さく、埋土や沖積層、道路、鉄道盛土を対象とすることが多いため、本研究の試験においても土かぶりは約 1m とし、掘削対象土は砂質土とした。

掘進試験の縦断勾配は、 $i=0.0\%$ の水平とし、刃口およびエレメントを設置する発進架台も、計画掘進勾配と同じ $i=0.0\%$ の水平とした。

ガイドパイプ（VP300）およびけん引用PC鋼より線の敷設は、実施工では線路下横断となるため、立坑から水平ボーリング工により行うこととなるが、今回は、開削工により模擬地盤を作成しながら事前に埋設した。

エレメントのけん引には $1,000\text{mm}$ ストロークの 1000kN 連続けん引型ジャッキ4基を用い、けん引架台によって、到達側の土留め壁から反力を得る構造とした。掘削は人力掘削を基本とし、掘削作業員を2名、エレメント内に設置する排土用ベルトコンベアへの積込み作業員を1名、計3名を刃口内に配置した。

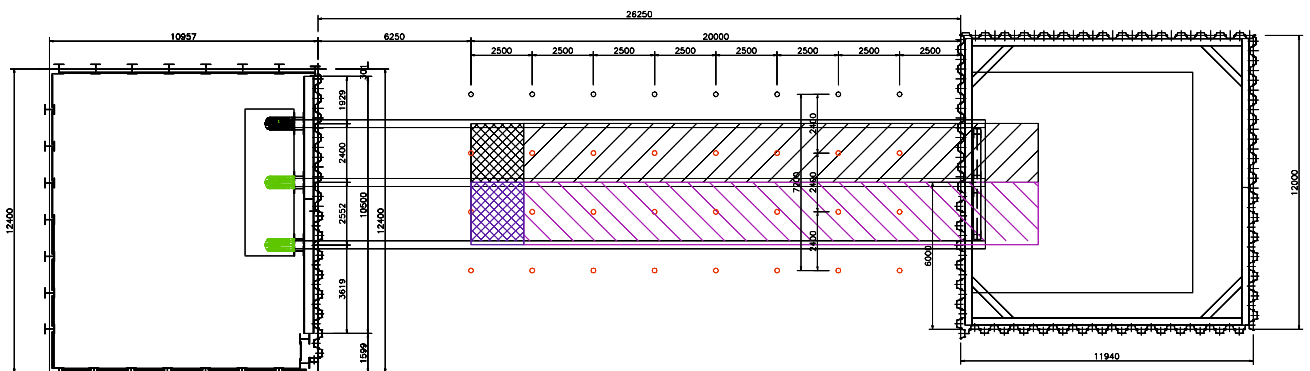


図 2.3.7 実験ヤード平面図

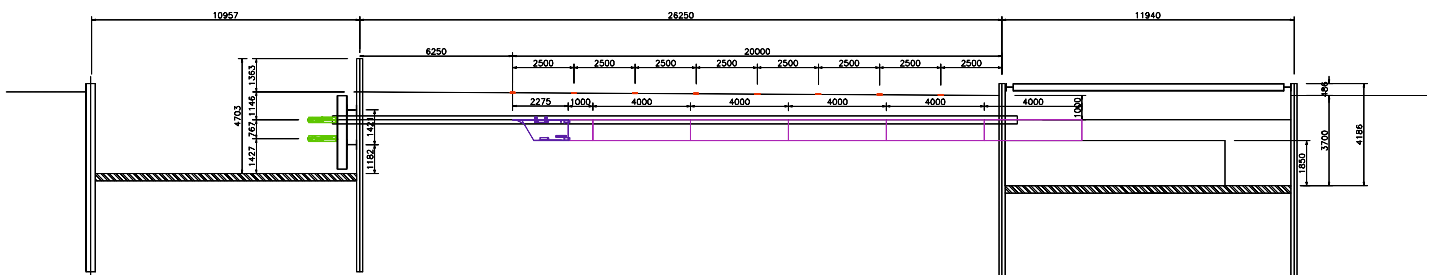


図 2.3.8 実験ヤード縦断面図

2.3.3 試験設備

本実証試験では、地盤切削機構に関わるもの以外は、従来の HEP&JES 工法で用いられる機械設備を使用した。表 2.3.3 および写真 2.3.9～2.3.16 に主要設備を示す。

表 2.3.3 主要試験設備一覧表

No.	名 称	仕 様	数 量	備 考
1	地盤切削装置	地盤切削ワイヤー ワイヤー駆動装置 プーリー駆動用油圧ユニット	1 式	基準用と一般部用を兼用
2	刃口	基準用	1 台	
		一般部用	1 台	
3	試験用エレメント	基準用 幅 2,400 mm×高さ 850 mm×長さ 4,000 mm	5 基	
		一般部用 幅 2,400 mm×高さ 850 mm×長さ 4,000 mm	5 基	
		刃口接続用 幅 2,400 mm×高さ 850 mm×長さ 1,000 mm	1 函	刃口後部に接続
4	連続けん引ジャッキ	100kN×St1,000 mm	4 台	到達立坑内に設置
5	ジャッキ用油圧ユニット	200V	1 台	到達立坑内に設置
6	中央操作盤	HEP&JES 工法用	1 台	計測室内に設置
7	ユニットベルコン	L=27m	1 台	エレメント内土砂搬出用
8	ベルトコンベア	L=10m	1 台	発進立坑土砂搬出用
9	チッピングハンマー	空気消費量：0.45m ³ /min	2 台	平ノミ付き
10	バックホー	0.7m ³	1 台	土砂搬出用
11	ミニバックホー	0.12m ³	1 台	立坑内土砂寄せ用
12	エンジンコンプレッサー	50HP 吐出空気量：5.0m ³ /min	1 台	ボックスタイプ
13	グラウトポンプ	3.7kw 40～100 リットル/min	1 台	滑材注入用
14	ハンドミキサー	100V	1 台	滑材混合用
15	送風機	φ300 mm	2 台	スパイラル風管 20m 付き
16	投光器 エンジン搭載式	400w×2 灯	2 台	
17	放送設備	スピーカーホン	1 式	
18	ガイドパイプ	VP300（推進用塩ビ管） 4,000 mm	84m	28m×3 列
19	架台用鋼材（発進・到達）	山留材	各 1 式	
20	計測室	ユニットハウス 2×3 間	1 棟	



写真 2.3.9 試験ヤード全景（左：到達立坑，右：発進立坑）

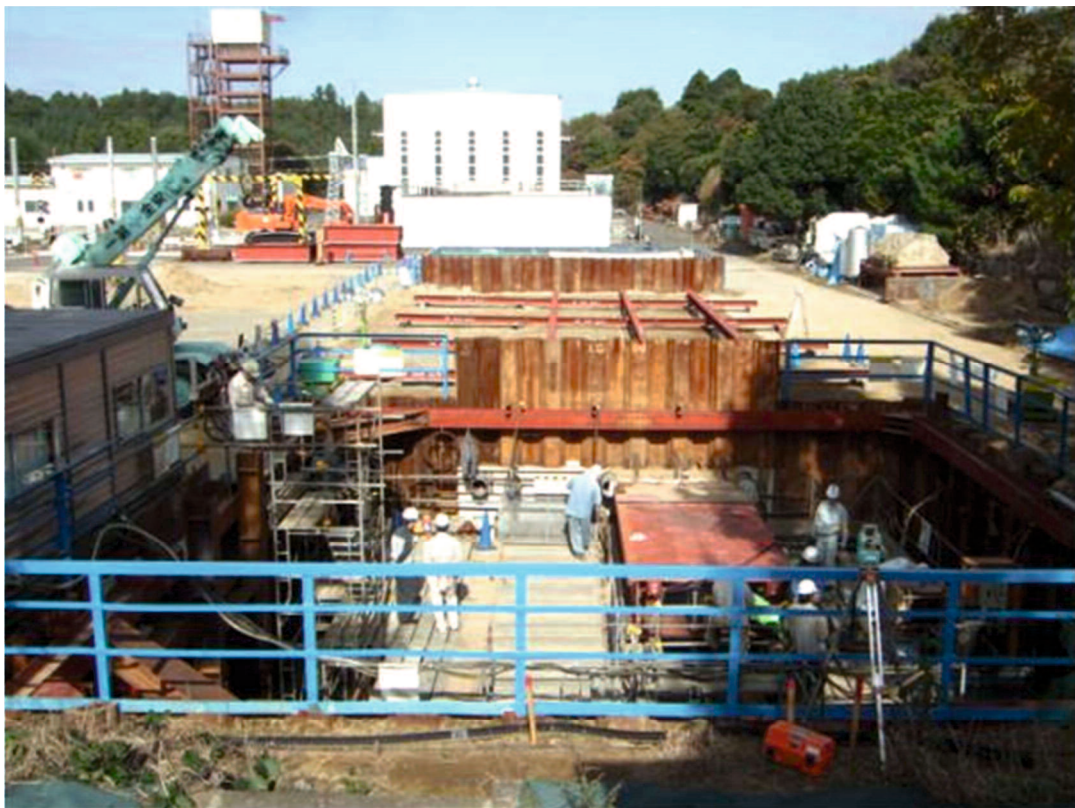


写真 2.3.10 試験ヤード全景（手前が発進立坑）



写真 2.3.11 発進立坑



写真 2.3.12 到達立坑



写真 2.3.13 連続けん引ジャッキ



写真 2.3.14 けん引ジャッキ洋油圧ユニット



写真 2.3.15 中央管理室



写真 2.3.16 エレメント内排土用ベルトコンベ

2.3.4 確認および計測項目

実証試験Ⅰでは、今回初めて適用する地盤切削機構によるエレメント掘進工法について、その掘削能力、耐久性および周辺地盤への影響について重点的に確認した。また、計測項目として、表 2.3.4 に示す項目について掘進期間中の計測を行った。

表 2.3.4 計測項目

計測項目	計測方法
けん引力	圧力トランスミッタ
移動距離・速度	ロータリーエンコーダ
地表面変位計測	高感度変位計
主プーリー油圧	圧力センサー
テンション機構の上下位置	ビデオカメラによる確認
エレメント位置測量	レベル・トランシット

2.3.5 試験結果

(1)けん引力

HEP&JES工法のけん引力は、第 1 章で示した通り、式(2.1a)～(2.1d)によい近似を示すことを確認している（例えば文献26）。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2.1a)$$

$$P_1 = S \cdot Q_r \quad (2.1b)$$

$$P_2 = \beta \cdot \mu \cdot P_m \cdot F \cdot L \quad (2.1c)$$

$$P_3 = \kappa \cdot L \quad (2.1d)$$

ここに、 P ：総けん引力(kN)

P_1 ：刃口先端の抵抗値 (kN)

S ：掘削用刃口の外周長 (m)

Q_r ：掘削装置の外周単位長さあたりの抵抗値(kN/m)

P_2 ：エレメント全周摩擦による抵抗値 (kN)

β ：滑材注入を行なう場合の低減係数

μ ：土とエレメントの摩擦係数

P_m ：周辺の平均土圧 (kN/m²)

F ：エレメントの単位長さあたりの外周面積(m²/m)

L ：けん引掘進長 (m)

P_3 ：継手部のかん合摩擦抵抗値 (kN)

κ ：エレメント単位長さあたりの継手部のかん合摩擦抵抗力 (kN/m)

である。

従来の実績では予測値の算出にあたっては、式 (2.1a) ～ (2.1d)に対して、以下の値を使用している。¹⁵⁾

$$Q_r = 98 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.2)$$

$$\mu \cdot P_m = 9.8 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.3)$$

$$\kappa = 20 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.4)$$

これに対し、西島らは、実施工における上床版の機械掘進結果より、それぞれの抵抗力の見直しを図っている³⁰⁾。西島らによると、当該工事での実績では、刃口の先端抵抗は従来実績より大きく、周面摩擦による抵抗値は打込み鋼管杭の式³¹⁾から計算される周面摩擦力 $2N \text{ kN/m}^2$ (N:N値)から検証するとほぼ同等、これより継手のかん合抵抗は若干小さくなり、 $\kappa=15\text{kN/m}$ 程度としている。また、開発段階の粘性土で行った施工試験と当該工事の砂質土の周面摩擦抵抗が、土質も土かぶりも異なるにも関わらず、ほぼ同様の式で示されることに対し、竹下らのURT工法でのエレメント推進時の先端抵抗と周面抵抗の研究より、N値が7以下の土質であれば一定値を示し、N値が7を超える ($N \geq 15$) とN値の増加に相関関係を示すことによることとしている³²⁾。

西島らの示した予測値を以下に示す。

$$Q_r = 160 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.5)$$

$$\mu \cdot P_m = 9.8 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.6)$$

$$\kappa = 10 \sim 20 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.7)$$

また、日下部らは、土かぶり $h=5 \sim 10\text{m}$ の原地盤部 ($N=7 \sim 11$) での側壁部での施工において、こちらは機械掘削と人力掘削の対比を行っている²⁶⁾。日下部らによると、刃口先端抵抗値は、機械掘削の値が従来の値と同等であったのに対し、人力掘削では18%程度と低い値を示したとしている。また、周面摩擦抵抗については、上層のシルト層が $\mu \cdot P_m=7.1$ であったのに対し、下層の微細砂含むシルト層では $\mu \cdot P_m=9.4$ であり、周辺平均土圧 (P_m) で除することにより、エレメントと周辺地盤の摩擦係数 μ が、シルト層で0.10、微細砂含むシルト層で0.13であったことを示している。

これら既往の研究を参考として、今回の実証試験における予測値を以下のように定めた。まず、刃口先端抵抗については、開発工法は人力施工であるため、機械掘削に対して小さい値となることが予想される。また、通常的人力掘削が余掘りによる上部地盤のゆるみを生じさせることのないよう若干、刃口を前方地盤に貫入させながら掘進することに対し、開発工法では、地盤切削した溝に先行ルーフを挿入していくことにより、刃口側面もほとんど貫入させることなく、掘進することが可能である。これより、今回の予測値では刃口の先端抵抗は0とする。

次に、周面摩擦抵抗については、実証試験における土かぶり $h=1.00\text{m}$ による周辺平均土圧 P_m と摩擦係数から $\mu \cdot P_m$ を算出すると表2.3.5の通りである。

表 2.3.5 周面摩擦抵抗

摩擦係数 μ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$\mu \cdot P_m$ (kN/m^2)	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8

既往の研究成果より，土かぶりやN値が小さくても周面摩擦抵抗はそれほど変動しないと予想されることから， $\mu \cdot P_m$ 値は従来の値9.8を採用する．

また，継手部の摩擦抵抗値についても，既往の研究成果より， $\kappa=20\text{kN/m}$ とする．

これより，今回の予測値は，式(2.1a)～式(2.1d)に対し，式(2.8)～式(2.10)の値を代入し算出ものとした．

$$Q_r = 0 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.8)$$

$$\mu \cdot P_m = 9.8 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.9)$$

$$\kappa = 10 \sim 20 \quad (\text{kN/m}) \quad (2.10)$$

2回の実証試験におけるけん引力と掘進距離との関係を示したものが図2.3.9である．

図2.3.9には，式(2.8)～(2.10)を用いた算出結果を予測値として，実証試験で計測したけん引力と併せて示してある．なお，1回目の試験では， $L=12.5\text{m}$ 地点以降は，刃口および後続のエレメント上面地盤の撤去を実施しながらのけん引であるため，有意なデータではない．

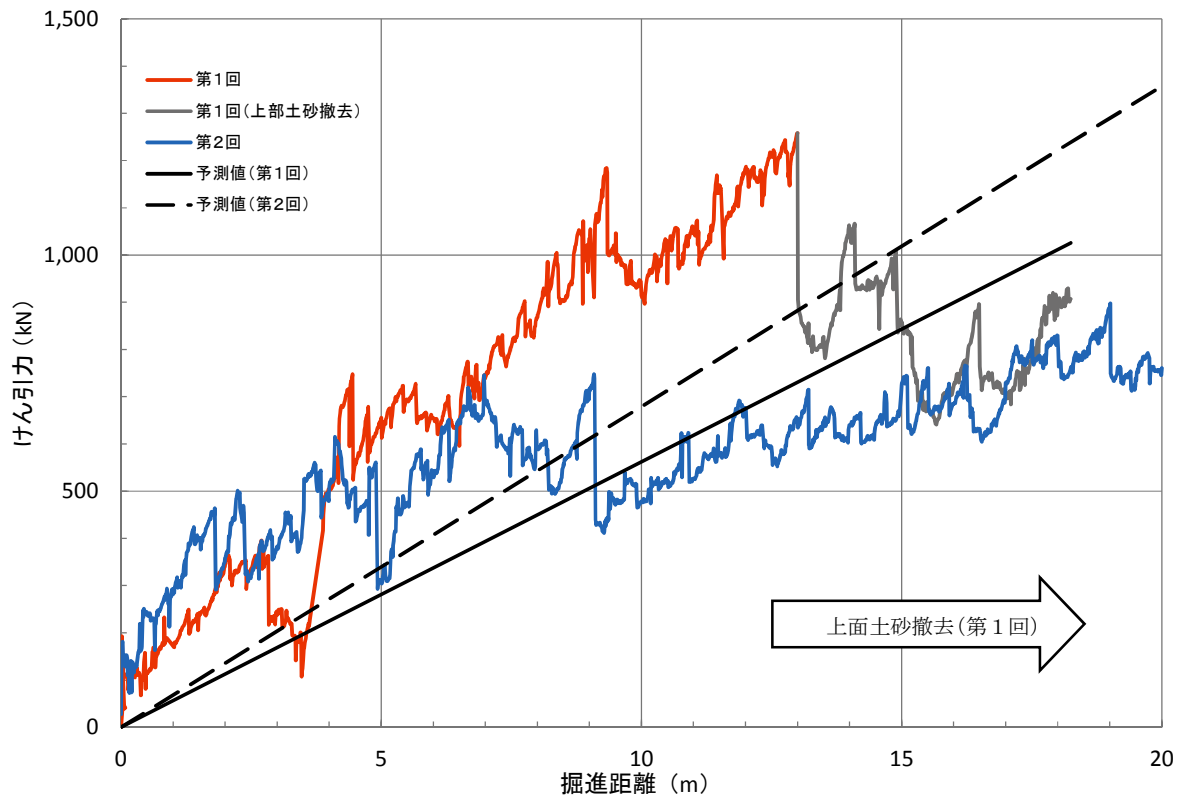


図 2.3.9 けん引力と掘進距離の関係

これより，1回目の掘進については，周面摩擦の影響がかなり高い値で推移していることがわかる．局所的にけん引力が下がっている $L=3\sim 4\text{m}$ 付近の値と，上部土砂を撤去した影響が見受けられる $L=13\text{m}$ 以降のデータを除去した場合について，最小自乗法により式 (2.11) に対し，近似直線を求めたのが，図2.3.10である．

$$P = \Delta P \cdot L \quad (2.11)$$

ここに, P : けん引力 (kN)

ΔP : けん引力の増分 (kN/m)

L : けん引掘進長 (m)

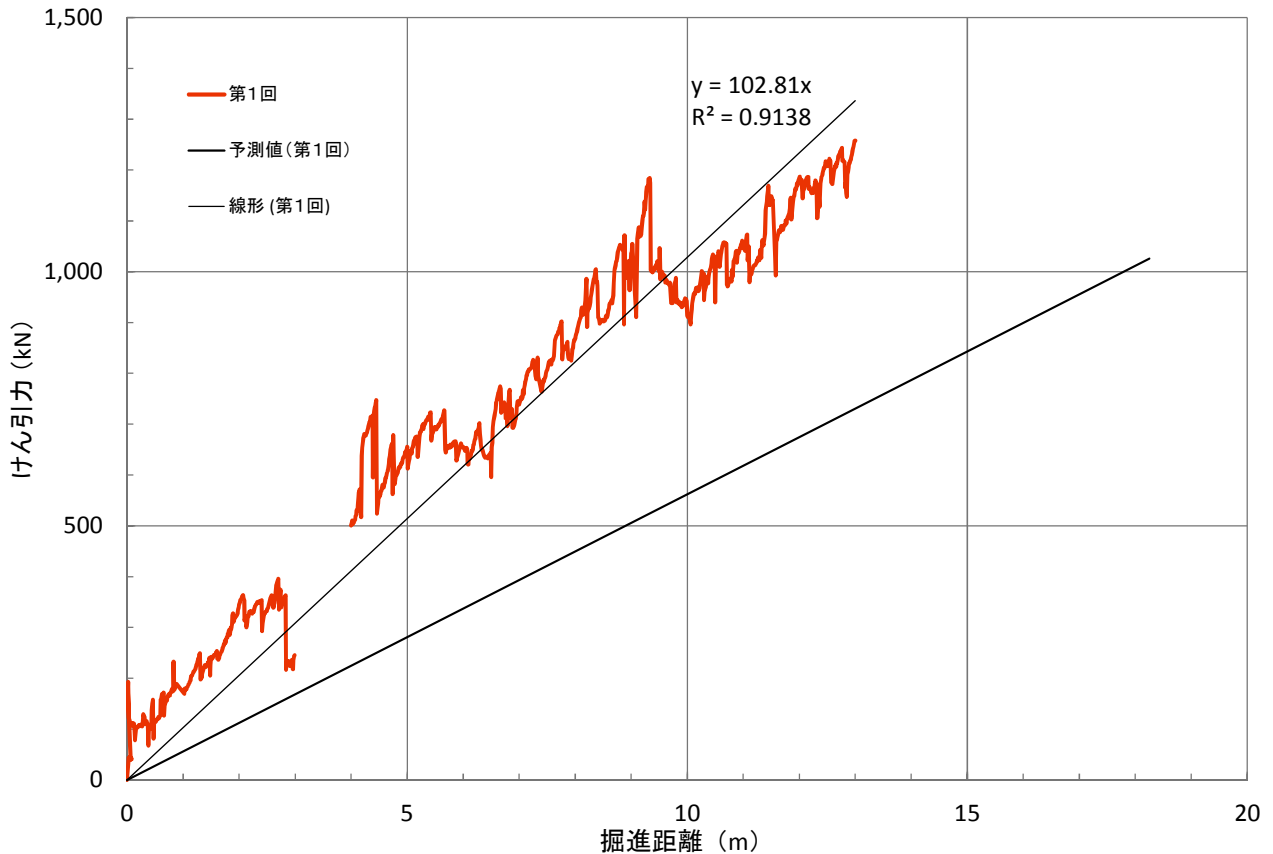


図 2.3.10 けん引力と掘進距離の関係 (1 回目)

図2.3.10に示した直線近似より, $\Delta P=102.81$ (kN/m) は継手をつなぐ1回目の基準エレメントの掘進では周面摩擦抵抗値のみを示しているため, これより, 式 (2.12) により, 平均土圧強度よりみかけの摩擦係数を逆算すると, $\mu_e=0.995$ と大きな値を示す. なお, P_m には, エレメント上戴土砂による鉛直土圧を考慮している. この原因に関する考察については, 後述する.

$$\mu_e = \frac{\Delta P}{\beta \cdot P_m \cdot F} \quad (2.12)$$

ここに, μ_e : 土とエレメントのみかけの摩擦係数

ΔP : けん引力の増分 (kN/m)

B : 滑材注入を行なう場合の低減係数

P_m : 周辺の平均土圧 (kN/m²)

F : エレメントの単位長さあたりの外周面積(m²/m)

2回目の一般部エレメントの掘進については、継手をかん合させながらの掘進である。L=7m程度までは第1回目の掘進と同様、高めのけん引力で推移しているが、その後、予測値を下回る値となり、L=20mまでは低めの値で推移している。こちらも、式(2.11)により直線近似を行い、式(2.13)によりみかけの摩擦係数を算出すると、 $\mu_e=0.552$ と低い値を示している。

$$\mu_e = \frac{\Delta P - \kappa}{\beta \cdot P_m \cdot F} \quad (2.13)$$

ここに、 μ_e ：土とエレメントのみかけの摩擦係数

ΔP ：けん引力の増分 (kN/m)

κ ：エレメント単位長さあたりの継手部のかん合摩擦抵抗 (kN/m)

$\kappa=20\text{kN/m}$ とする。

β ：滑材注入を行なう場合の低減係数

P_m ：周辺の平均土圧 (kN/m²)

F ：エレメントの単位長さあたりの外周面積(m²/m)

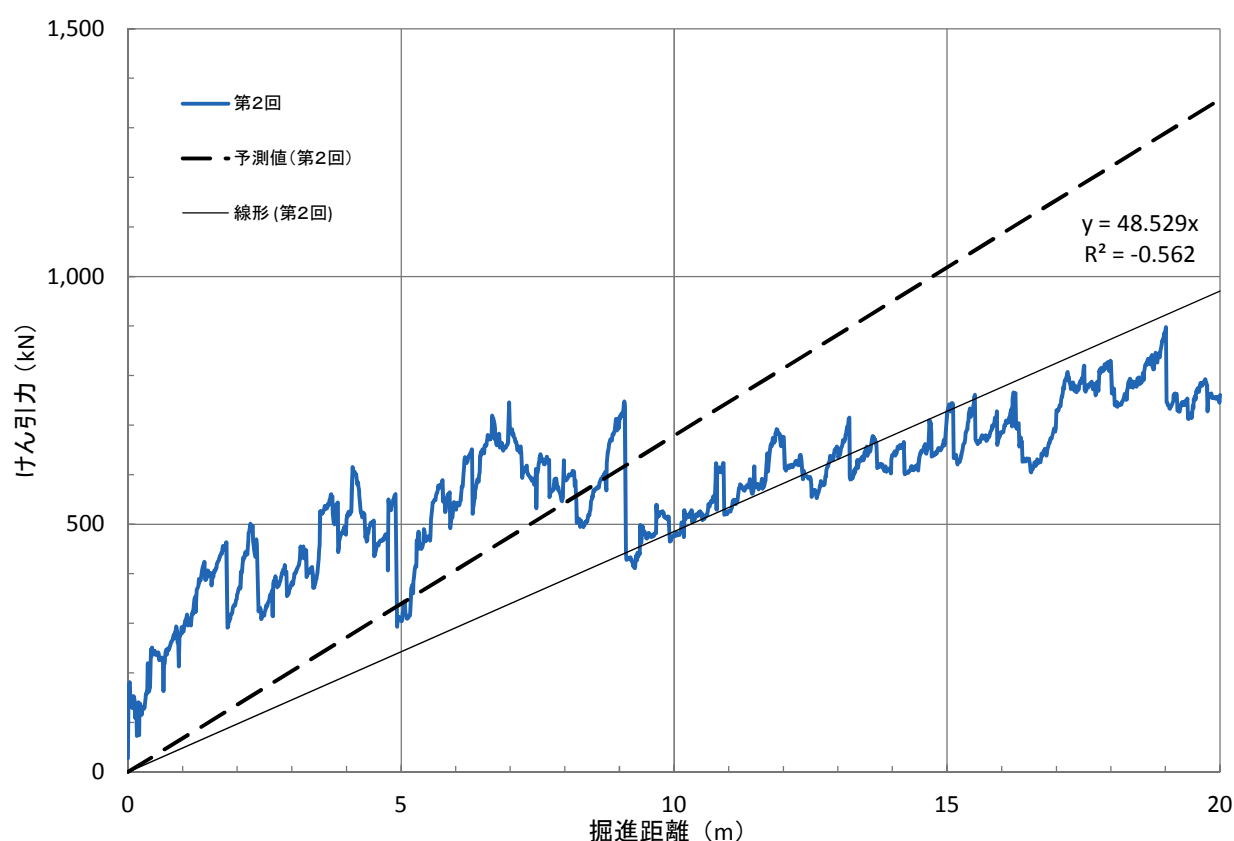


図 2.3.11 けん引力と掘進距離の関係 (2 回目)

この結果から、地盤切削による溝に先行ルーフを挿入していくことで、地表面に影響を与えない状態での掘進を行うことにより、けん引力を小さくできることが判明した。

(2)地表面変位

本実証試験では、発進立坑の土留め中心位置から6.25m地点より、2.5mピッチで地表面の鉛直方向変位を計測している。計測方法は、各測点にエレメントの掘進方向と直角方向に計測ばりを設置し、この計測ばりに取り付け高感度変位計を用いて、地表面の変位量を計測するものである。エレメントの掘進方向の計測ラインは、エレメント中央部の直上とその左右2.4mの位置に設けた。図2.3.11にはそれらの計測位置を示している。

一般に、エレメント掘進時の路面への影響とは、施工箇所近傍の鉛直方向への変位が問題となる場合が多く、鉄道の場合、軌道整備基準値である34mm程度³³⁾、高速道路等の場合、保全点検要領等に示される路面段差の基準30mm程度を準用し³⁴⁾、これらを限界値として、管理体制に応じて段階的に管理値を定めている場合が多い。

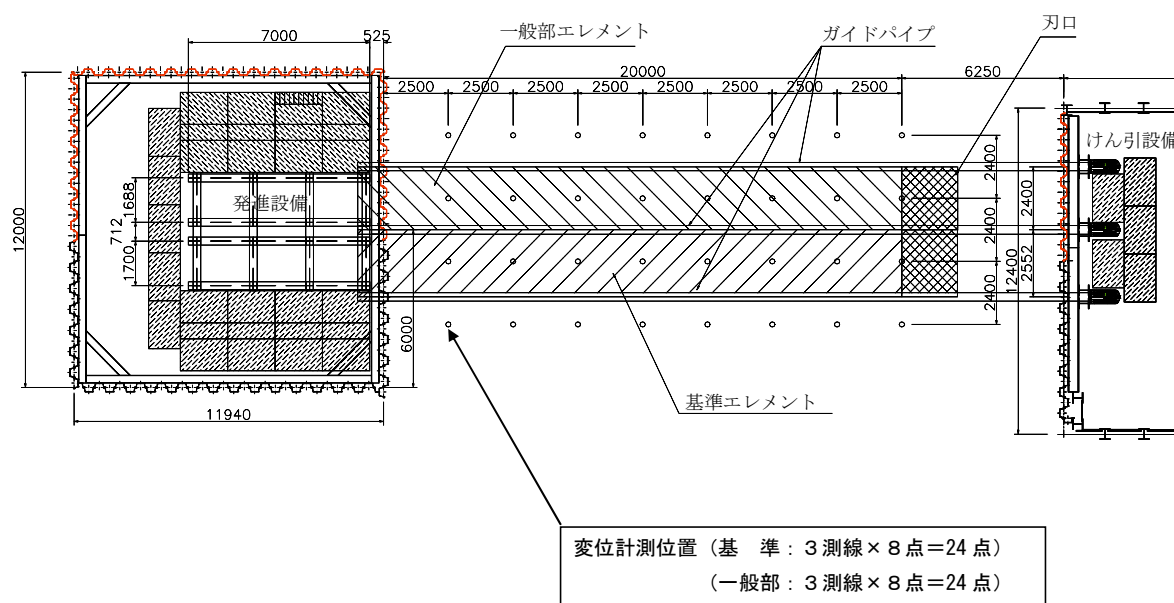


図 2.3.11 地表面計測位置図

a)1回目（基準エレメント）

1回目の掘進試験において、掘進距離1m付近より、刃口上部から前方での隆起現象および刃口通過後の沈下減少が顕著に認められた。エレメントの掘進に伴う各計測点でのエレメント中央部の地表面変位量を図2.3.12～2.3.15に示す。この図より、刃口中央部の計測点は、刃口の先端の接近に伴い、急激な隆起傾向を示し、刃口の通過後には沈下する傾向を示していることがわかる。

この計測結果より、刃口およびエレメント上部の地盤が掘進に伴い、前方にひきずられていることが、前方地盤の隆起の原因となっていることを想定し、L=12.5m地点において、刃口および後続のエレメント上部の地盤を撤去し、掘進を再開したが、事象の改善は認められなかった。

このことから、2回面の一般部エレメントの掘進前に、地盤切削刃口部分の改良を行った。

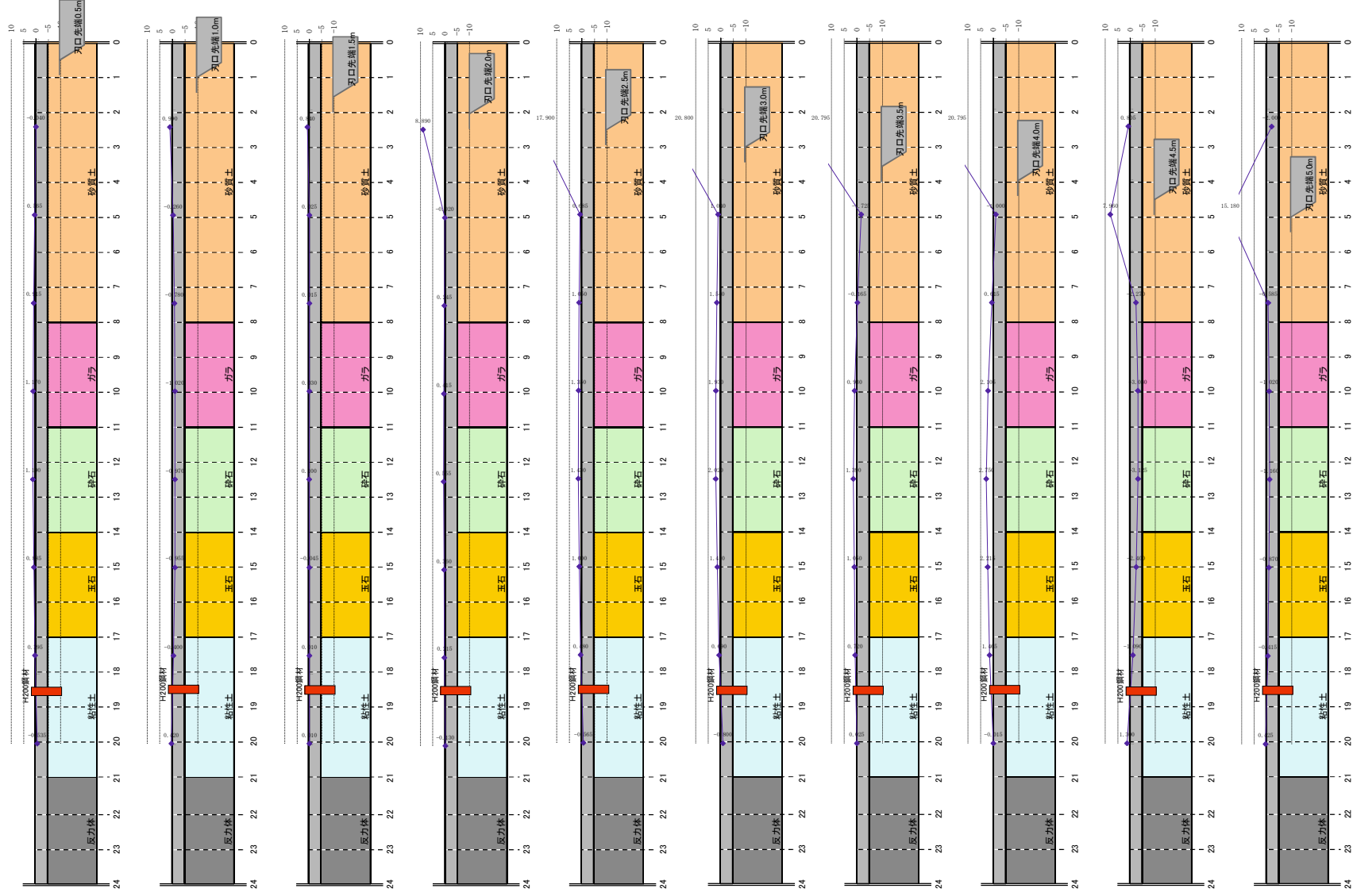


図 2.3.12 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（基準エレメント：その1）

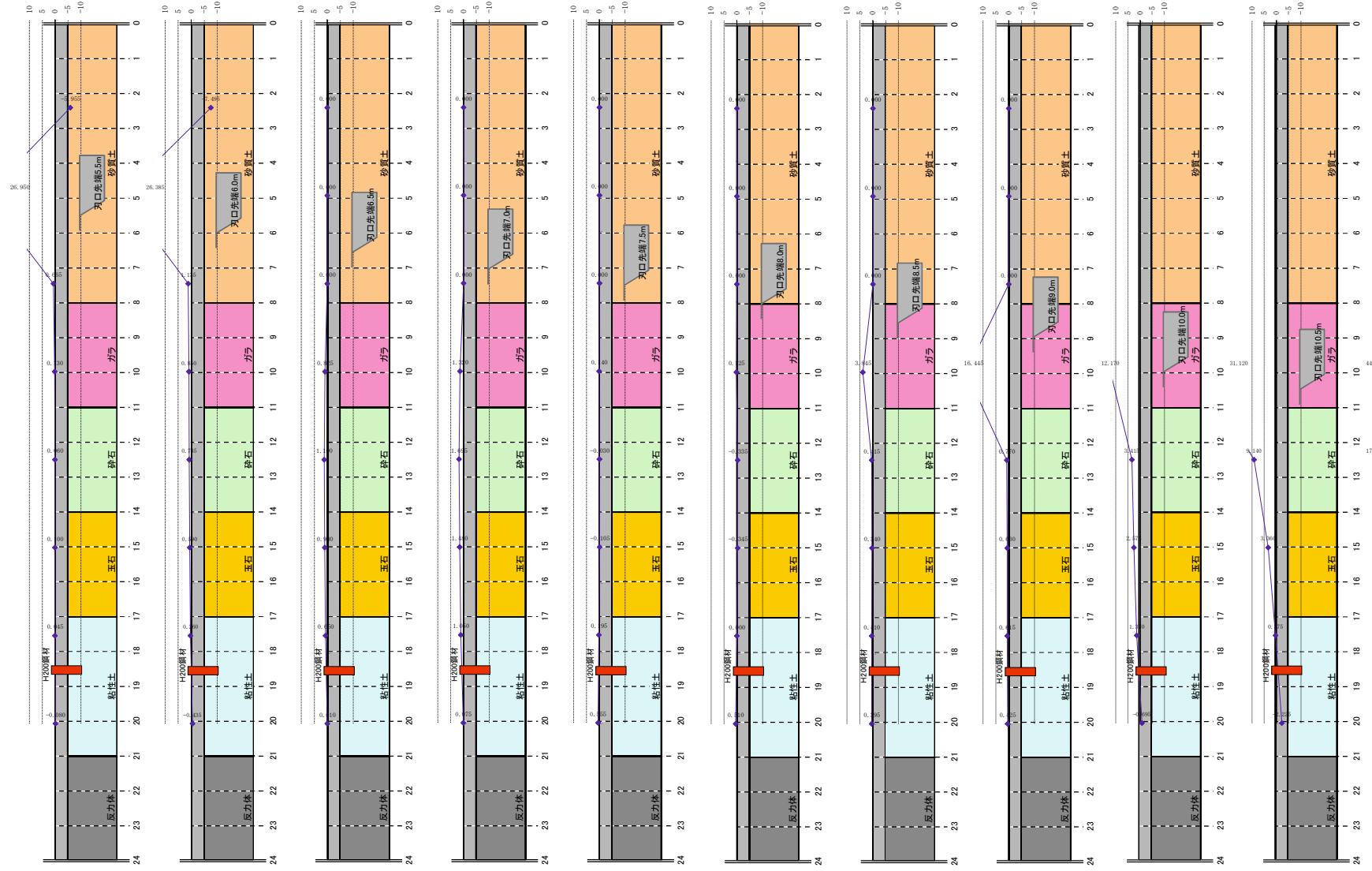


図 2.3.13 刃口の掘削位置と地表面変位の関係 (基準エレメント: その2)

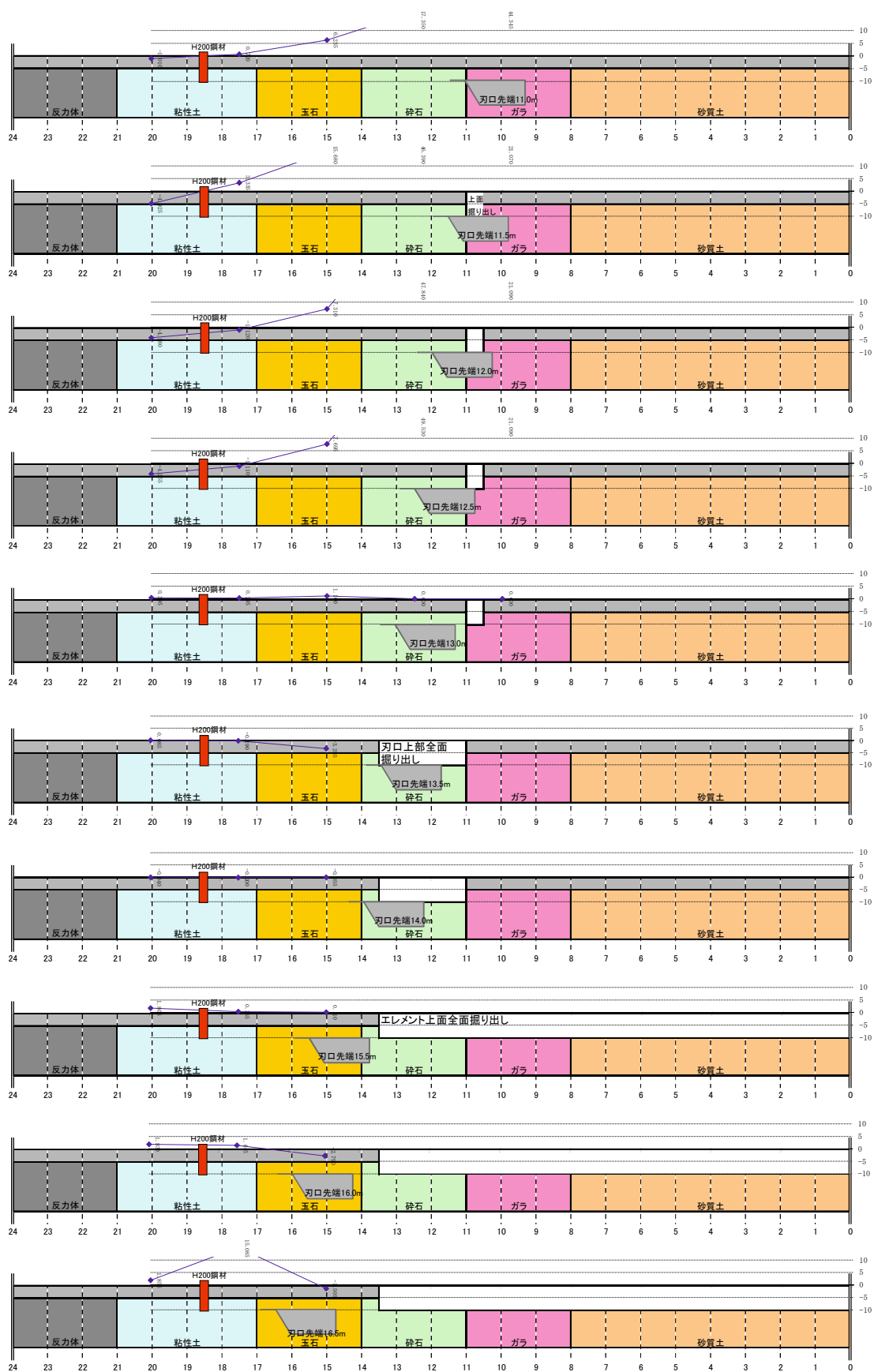


図 2.3.14 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（基準エレメント：その3）

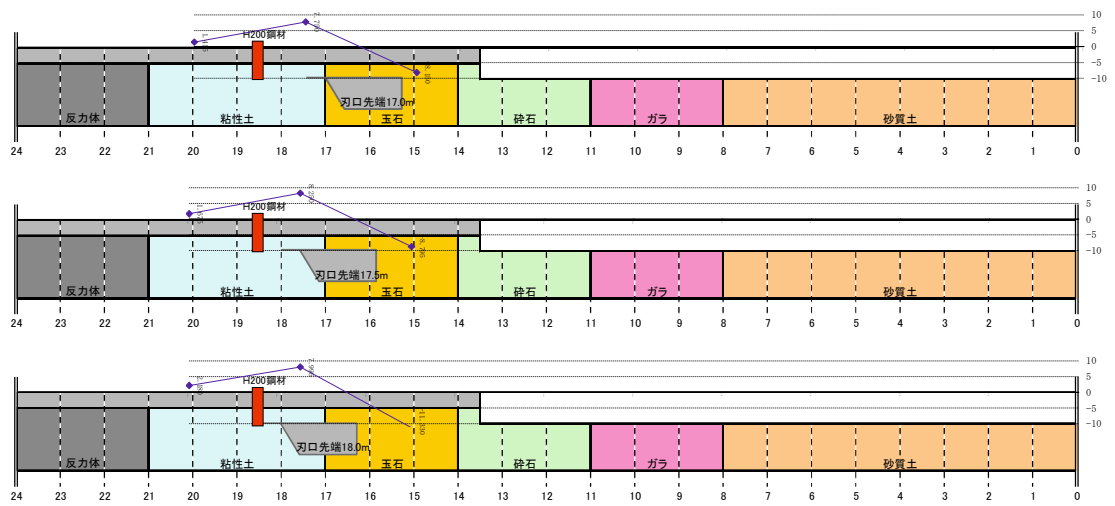


図 2.3.15 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（基準エレメント：その 4）

b)地表面影響低減対策

①刃口先端部補強

1回目の掘進時、刃口先端中央部が左右隅部に対し、約23mmのたわみが生じていることを確認した。これより、先行ルーフがたわみによる変形で、地盤切削した溝に正しく挿入されることなく、地盤を前方に押し上げるような形で掘進したものと想定した。そのため、1回目のけん引力は高めの値で推移し、地盤変位も先行隆起、後続沈下が著しい値となったものと考えられる。

対策として、地盤切削した溝に確実に先行ルーフ部を挿入できるよう、刃口中央部に仕切り鋼板を設置し、たわみスパンを半減することで、たわみ量の減少を図った。また、先行ルーフ部も下面に補強鋼板を貼り付けることで、剛性向上を図った。図2.3.16に補強箇所図を、写真2.3.17、2.3.18に取付状況を示す。

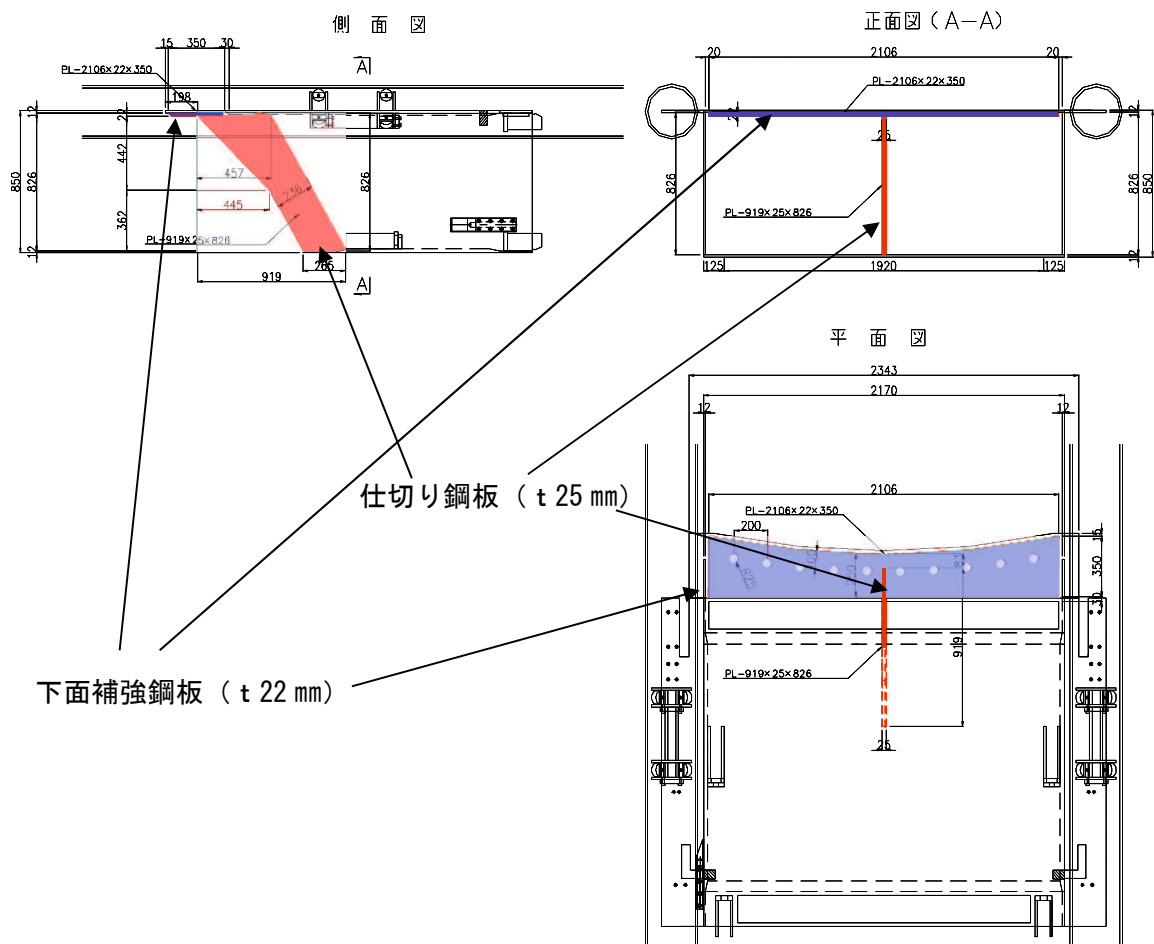


図 2.3.16 刃口先端補強箇所図



写真 2.3.17 仕切り鋼板設置状況



写真 2.3.18 下面補強鋼板設置状況

②摩擦低減対策

また、地表面変位抑制対策として、横幅の広い刃口後続エレメント上の地盤が、掘進とともに前方へ移動することに対する対策を講じることとした。

このようなエレメント周面の摩擦低減対策としては、第1章で述べたように、竹下により、先掘り工法、フリクションカッター工法、滑材を用いる方法等が示されている²⁴⁾。

しかし、開発工法では、これらの対策に対し、表2.3.6に示す課題があり、適用することはできなかった。

表 2.3.6 エレメント周面摩擦低減対策

対策案	開発工法に適用する場合の課題
先掘り工法	開発工法の刃口は、地盤切削による溝に先行ルーフを挿入していくことで、切羽の安定を確保しているため、先掘りを行った場合、切羽が不安定となる。
フリクションカッター工法	刃口、エレメント上面は地盤切削による溝に先行ルーフを挿入していくため、余掘りがほぼ0となっている。フリクションカットにより余掘りを設けることは、開発工法の地表面影響低減策と合致しない。
滑材を用いる方法	滑材は、フリクションカッターと同時に用い、周面余掘り部に滑材を充填することで、より摩擦低減を図るものである。よって、やはり開発工法の地表面影響低減策と合致しない。

これより、刃口上面に余掘りを設けることなく摩擦低減を図る手段として、刃口後方より、ポリエチレンシートをエレメント上面へ送り出すこととした。ポリエチレンシートは、240mm幅のものを刃口上面内部にロール状に7列配置しておき、端部は、発進立坑部に固定し、エレメントの移動に伴って、エレメントと地盤の間に送り出すこととした。写真2.3.19、2.3.20に取付状況を示す。



写真 2.3.19 ポリエチレンシート設置状況



写真 2.3.20 発進立坑部シート固定状況

c)2回目（一般部エレメント）

2 回目の掘進試験時の各計測点でのエレメント中央部の地表面変位量を図 2.3.17～2.3.20 に示す。各計測点において、多少の先行隆起，後続沈下の影響は認められるものの，1 回目に比べてその値は格段に小さく，隆起方向で最大 2.1mm，沈下方向で最小 2.7mm であった。これより，刃口の剛性向上および上面の摩擦低減という影響低減対策の有効性を確認した。

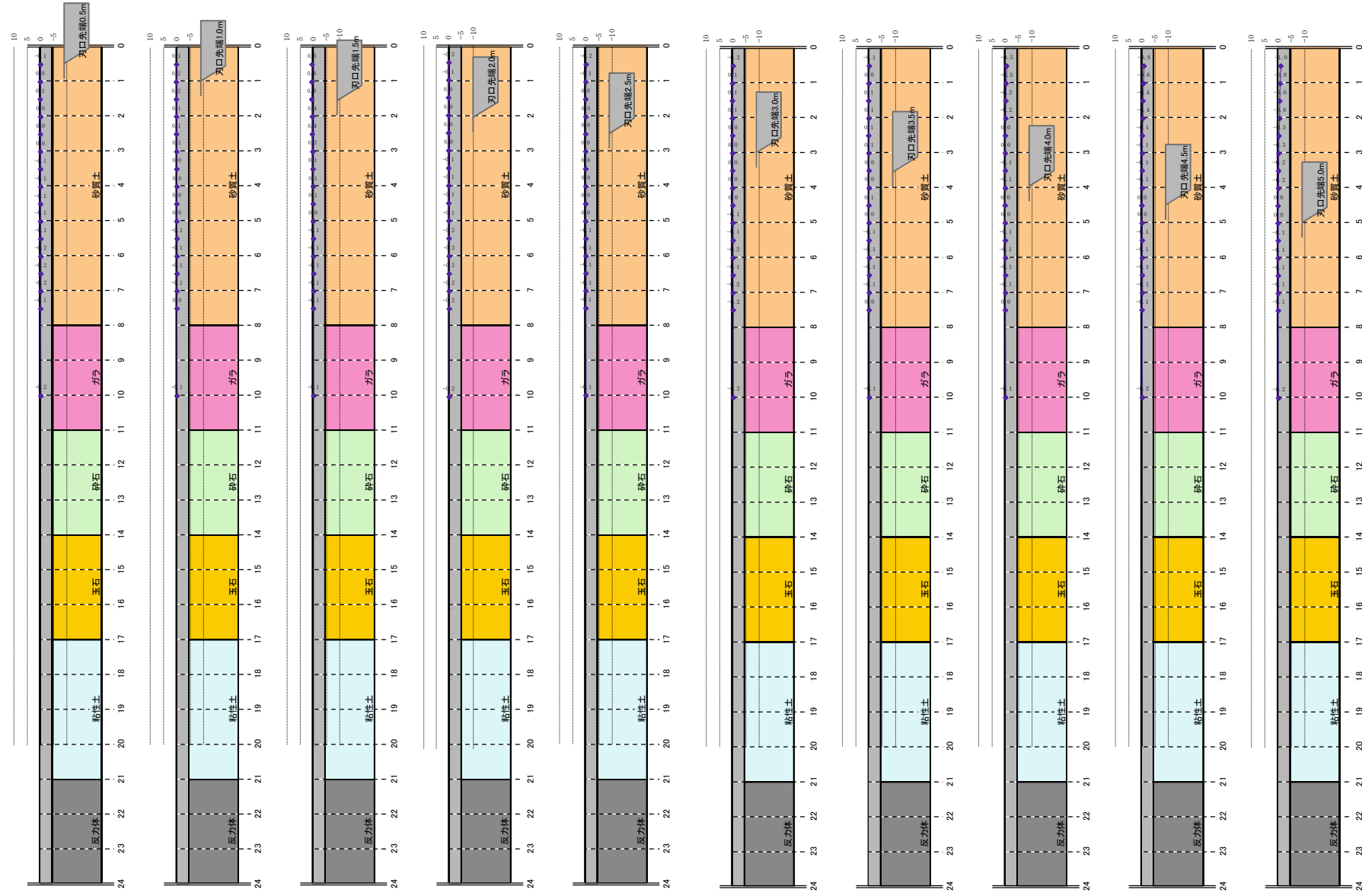


図 2.3.17 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（一般部エレメント：その1）

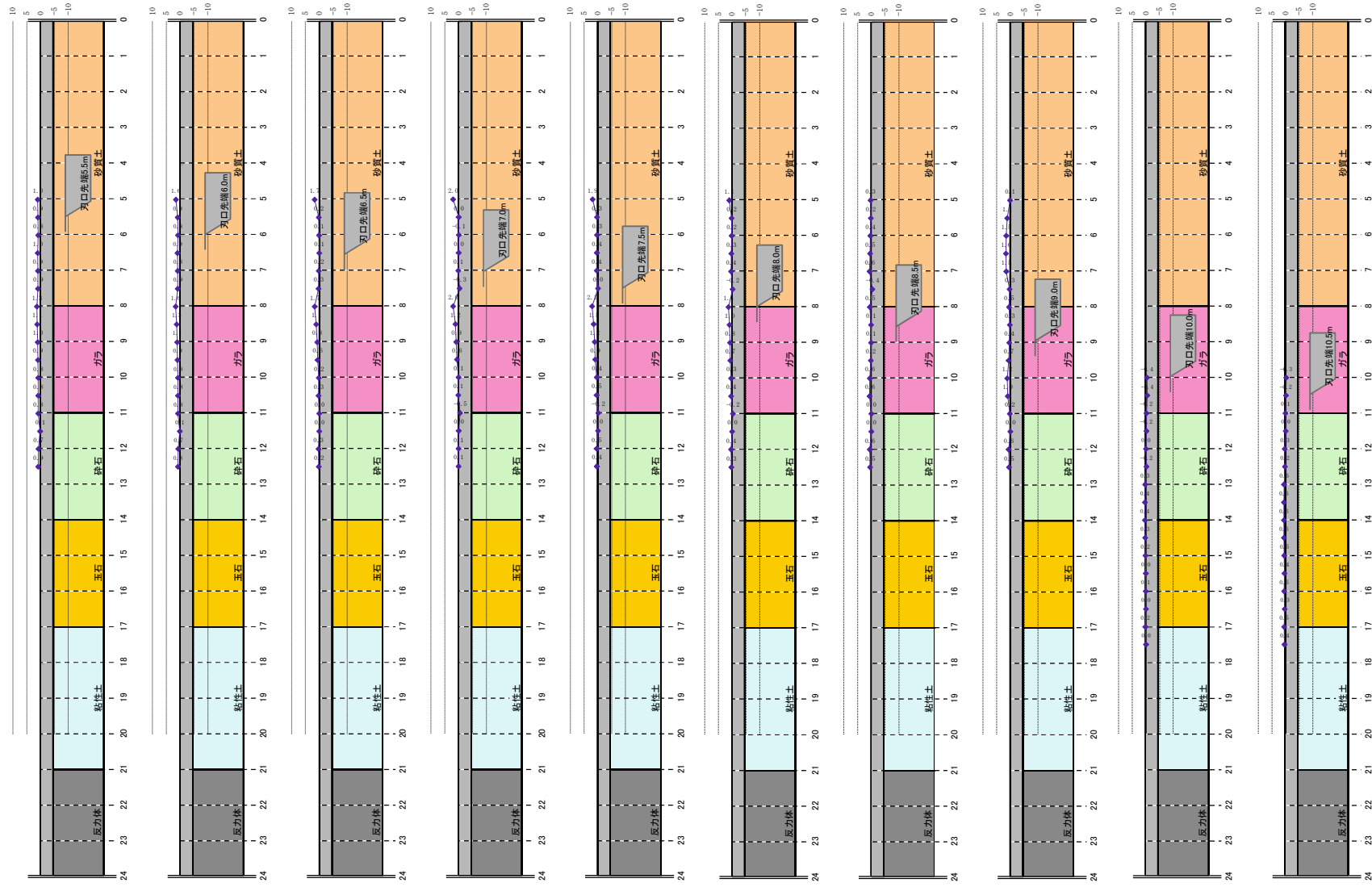


図 2.3.18 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（一般部エレメント：その2）

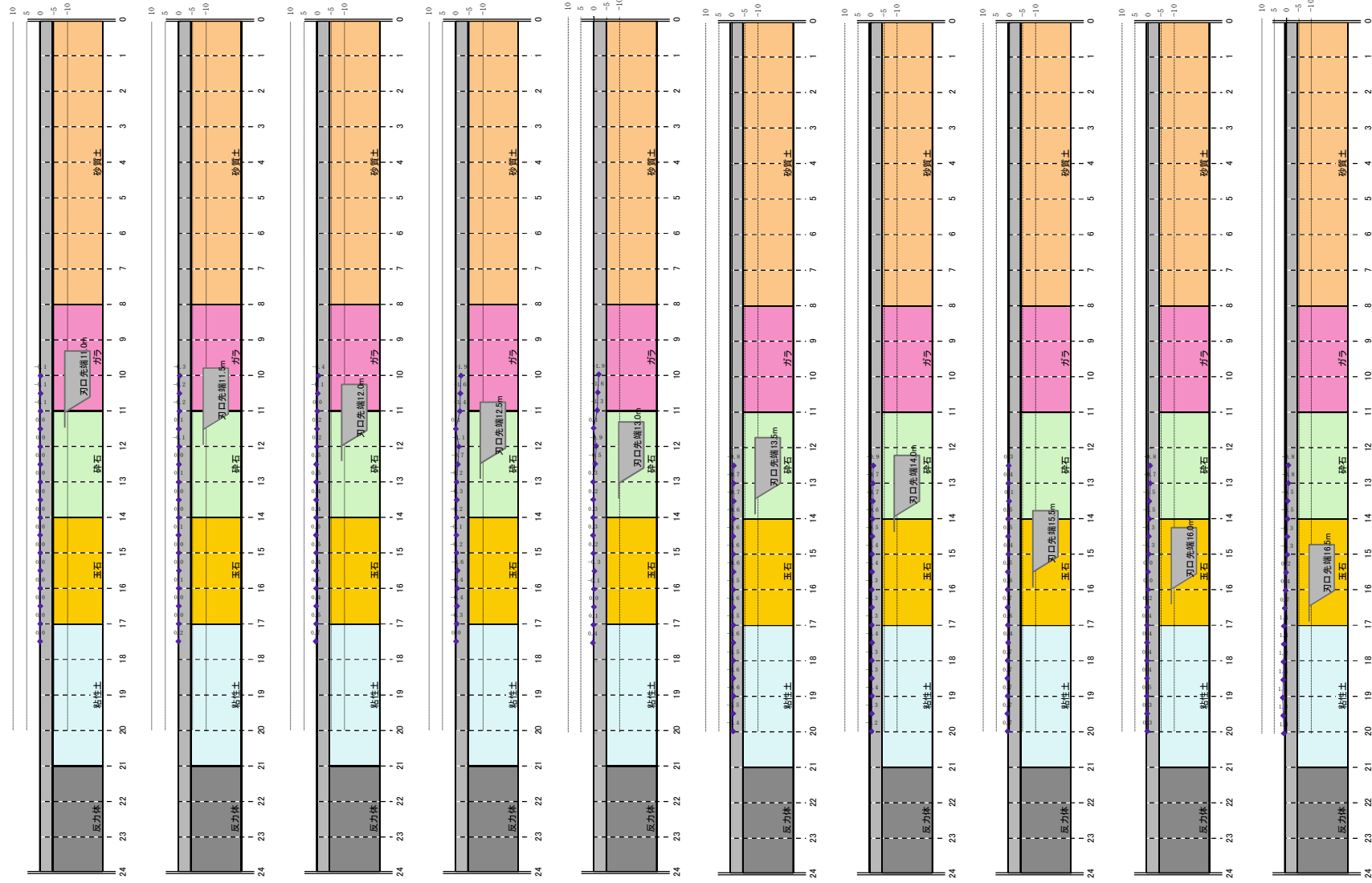


図 2.3.19 刃口の掘削位置と地表変位の関係（一般部エレメント：その3）

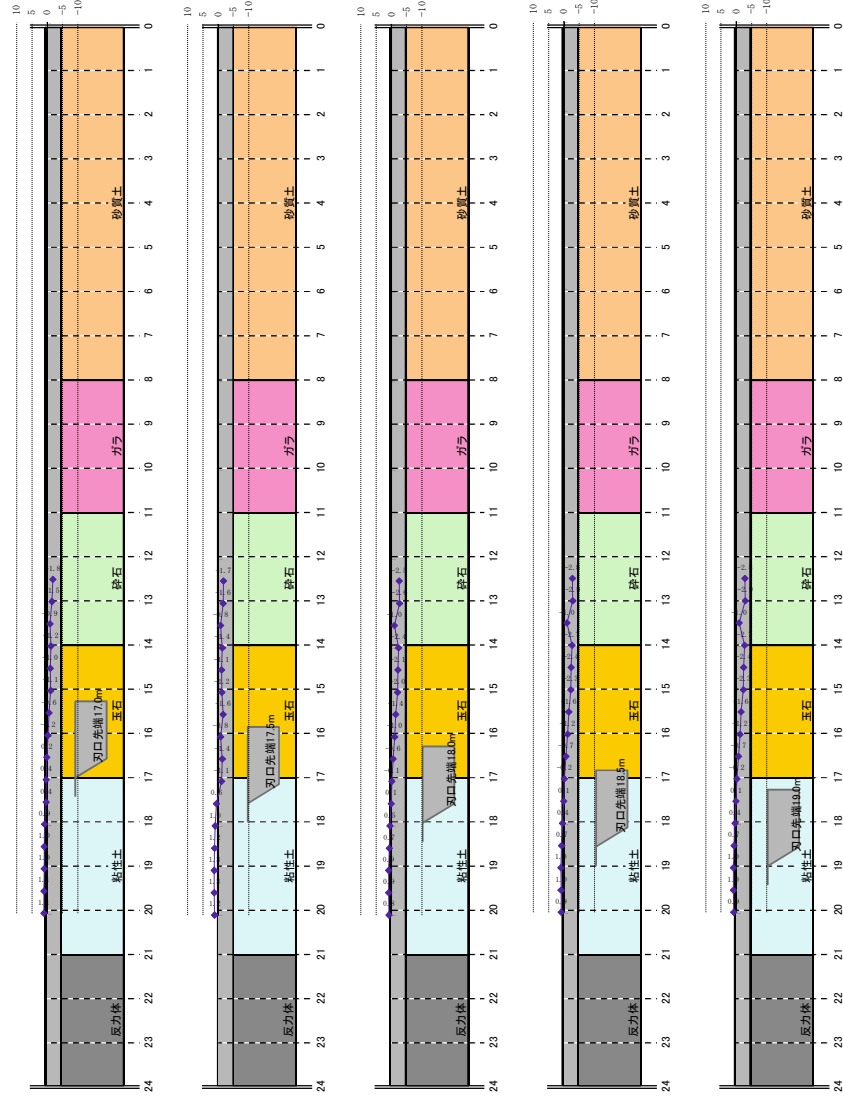


図 2.3.20 刃口の掘削位置と地表面変位の関係（一般部エレメント：その 4）

(5)施工精度

エレメント掘進中の精度管理は、掘進距離 1m 毎にレベルおよびトランシットにより施工精度の確認を行いながら掘進した。

それぞれのエレメント掘進試験完了後に、再度レベルおよびトランシットにより設置精度の確認を行っている。一般に工事で定めるエレメントの設置精度は、掘進距離 L に対し $\pm 0.2\%$ ³⁵⁾であり、今回掘進長 20m については、40mm が基準となる。図 2.3.21 に水平方向、図 2.3.22 に鉛直方向のそれぞれ計画ラインからの偏差を示す。いずれも偏差の基準値内の値となっている。しかし、基準エレメントの偏差が後続の一般部エレメントに影響を与える結果となっており、これは継手部分の遊間が小さく、単独のエレメントでは修正が困難であるという HEP&JES 工法の特徴を示している。特に、今回横幅の大きなエレメントを採用しており、鉛直方向の精度管理において、左右の高さの差（以下、ローリングという）が生じた場合の修正が困難であった。基準エレメントで生じたローリングを一般部で修正することは困難であり、基準エレメントの掘進時の精度管理が重要である。

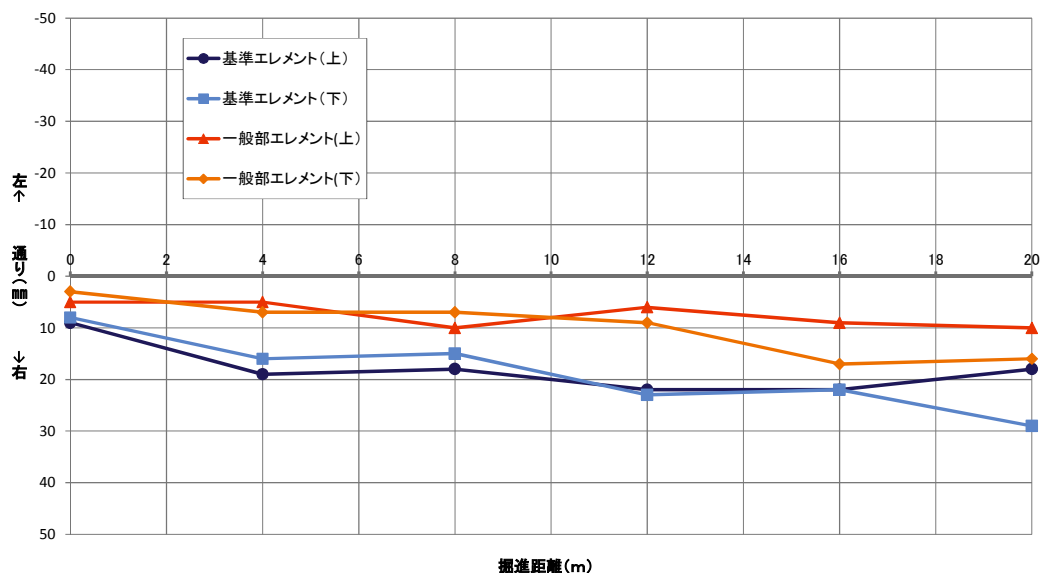


図 2.3.22 エレメント精度計測（水平方向）

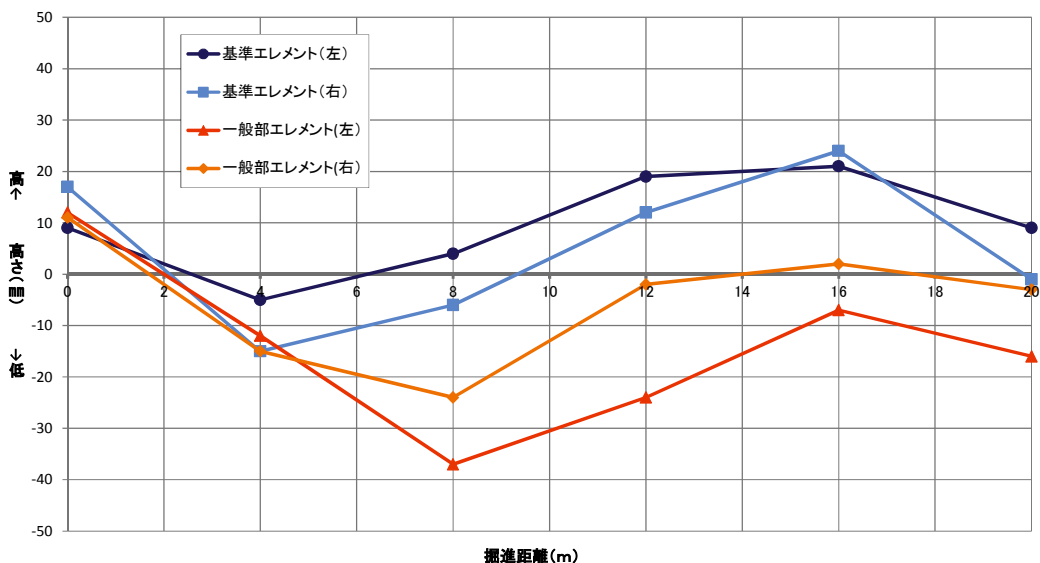


図 2.3.23 エレメント精度計測（鉛直方向）

2.3.6 成果と課題

(1)地盤切削機構を有する刃口構造

実証試験Ⅰにより、今回考案し、設計、製作した地盤切削機構を有する刃口の実用性を検証した。今回の試験より、ガイドパイプを利用し、地盤切削ワイヤを取り回し、刃口の上面鋼板の剛性を十分に確保することで、地盤切削した溝に先行ルーフを正しく挿入しながらの掘進作業が可能であることを確認した。また、支障物も刃口断面内に出現する部分だけを切断・撤去できることを確認した。

(2)けん引力

1回目の掘進試験より、刃口の剛性が不足した場合、刃口上面鋼板のたわみにより先行ルーフが地盤切削した溝に正しく挿入されないため、過大なけん引力が発生するとともに、地表面影響が顕著となることを確認した。

刃口が十分な剛性を有している場合、地盤切削により形成した土中の溝に先行ルーフを挿入していくことで、刃口先端を切羽に押し付ける必要がないことから、刃口の先端抵抗はほぼ 0 とできることを確認した。またこの場合、エレメント周面摩擦抵抗は、エレメント上戴土砂の荷重に対し、みかけの摩擦係数 $\mu_e=0.552$ 程度であった。

(3)地表面影響

1回目の基準エレメント掘進時の先行隆起、後続沈下に対し、2回目の一般部エレメント掘進時の地盤切削刃口の剛性向上、エレメント上面の摩擦低減対策は、一定の効果を確認できた。これより、地盤切削により形成した土中の溝に確実に先行ルーフを挿入すること、またエレメント上面の上部地盤との摩擦低減を図ることで、地表面への影響を従来の工法以上に小さくできることものと考ええる。

(4)エレメント精度

開発工法では、施工速度確保のため、従来のエレメントに比べ約 2 倍の横幅としている。このことから、ローリングに対しその修正が困難であること、また継手を施工上のガイドとしている HEP 工法では、その継手部の遊間が小さいことから、先行のエレメントが顕著なローリング傾向にある場合、後続のエレメントでこれを修正することが困難であり、できるだけきめ細かな方向修正による精度管理が求められることが判明した。

(5)地盤切削機構の耐久性

今回の試験では、上記課題に加え、地盤切削機構でのトラブルも頻発した。その主なものは、ワイヤーを回転させる駆動プーリーの油圧モーターの運転支障、地盤切削ワイヤーの破断、プーリーの磨耗、損傷である。これらの原因および現時点での対策案を以下に示す。

a)油圧モーターの運転支障

今回採用した油圧モーターは、軌道直後や礫切削時、異常停止時等の急激な負荷上昇により、油圧パッキンの損傷による油の漏出が頻発した。これに対しては、油圧ユニット、油圧モーターの組み合わせや配管経路等を含めた構造検討が必要である。

b)地盤切削ワイヤーの破断

地盤切削ワイヤーは、やはり負荷上昇時における破断が頻発し、その多くはワイヤージョイント部での破断、抜けであった。今回、試験に用いたジョイントは写真 2.3.21, 2.3.22 に示す鋼管スリーブタイプとユニバーサルジョイントタイプであったが、2 回の掘進試験における総運転時間 2,400 時間において破断等による交換を行い、計 8 本のワイヤーを使用した。これらのワイヤーは磨耗等によるものではなく、写真 2.3.23 に示すように、ジョイント部の繰り返し曲げによる疲労破断とみられる破断形状であった。



写真 2.3.21 ワイヤージョイント部
(鋼管スリーブタイプ)



写真 2.3.22 ワイヤージョイント部
(ユニバーサルジョイントタイプ)



写真 2.3.23 ワイヤー破断形状

この事象に対する対策としては、ワイヤーの曲げ伸ばしによる屈曲時の半径の拡大（プーリー径の拡大）やプーリー数の減少による曲げ伸ばし回数の減少等により、繰り返し曲げによるダメージを減少させることで寿命の延長を図ることが求められる。また、一部では、ジョイントを使わないエンドレスワイヤーも用いられているため、この適用も検討する。

c)プーリーの磨耗, 損傷

地盤切削ワイヤーが、刃口前方で地盤切削後、ガイドパイプ内を通過して、駆動装置部でガイドパイプから刃口内に戻り、駆動プーリー部へと導かれるようプーリーが配置されて

いる。その内訳は、先端プーリー（ガイドパイプ内）2 個、ガイドパイプ内 10 個、刃口内 4 個、駆動プーリー1 個の計 17 個であり、その径は、最大φ280mm、最小φ90mm である。材質は、その径に応じて、ゴムやナイロンを使い分けていたが、ナイロン製のプーリーに磨耗が多く発生したため、ゴムに変更した。また、プーリー内のベアリングの損傷により回転不能となって、磨耗したものについてもその都度交換を行った。結果として、17 箇所のプーリーのうち、12 箇所においてプーリーを交換した。

対策としては、プーリー配置の見直しによる全体数の減少、プーリーの材質の変更等が求められる。

2. 4 まとめ

地表面への影響低減を目的とした新しいエレメント掘進工法を考案し、その掘進用刃口を設計・製作した後、実物大の実証試験を行うことにより、実用性について検証した。以下に、今回の試験において得られた知見および課題について列記する。

- ・本切削機構により、支障物等が混在する地盤においても無水ワイヤーで切削し、エレメント掘進可能であることを確認した。
- ・刃口の剛性を確保し、エレメント上面の摩擦低減を図ることで、地盤を切削した溝に先行ルーフを挿入していく方法によりけん引力も従来の工法に比べて小さくすることが可能であり、余掘りが少ないため、地表面影響を軽減できる。
- ・通常の管理により、求められる掘進精度管理は可能である。しかし、横長のエレメントのため、ローリングに対しては、きめこまかな方向修正が必要である。
- ・耐久性向上のためには、油圧モーター、地盤切削ワイヤー、プーリーについて、再検討が必要である。

第3章 開発工法の改良

3. 1 開発工法の課題と対策

第2章で示したように、開発工法はその実用性が確認できた一方で、いくつかの課題を抽出した。工法の確立のために、これらの課題に対し、以下に示すような対策を検討した。

3.1.1 駆動モーターのトラブル対策

駆動モーターを油圧モーターから電動モーターに変更した。前回の実証試験では、背圧等によるパッキンの損傷が頻発したため、モーター自体の耐久性を考慮し、電動モーターを採用した。容積・重量は油圧モーターに対して大きくなったが、配置を検討することで、刃口内に収めることを可能とした。写真3.1.1、3.1.2に新旧の駆動モーターの配置状況を示す。

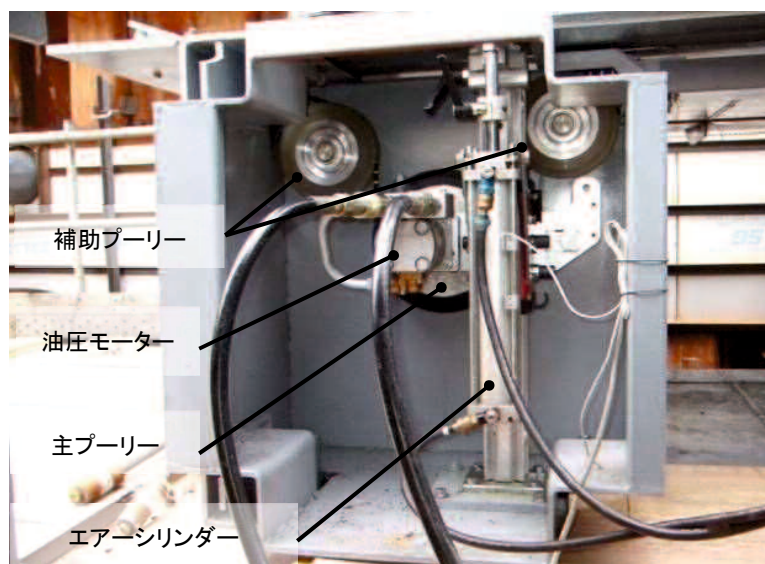


写真 3.1.1 実証実験時の駆動油圧モーター



(a)電動モーター配置状況



(b)刃口内への設置状況

写真 3.1.2 電動モーターへの変更

3.1.2 地盤切削ワイヤーの破断対策

実証実験において、ワイヤーのジョイント部での破断が頻発したため、無水で地盤切削可能な写真 3.1.3 に示す専用のエンドレスワイヤーを製作し、採用した。エンドレスワイヤーは、素線を編み込んだ形で環状としており、編み込み部を複数のダイヤモンドビットで圧着することで、ほどけることのないよう配慮している。ワイヤー延長は、刃口設計により定められており、ダイヤモンドビットのピッチについても、土砂の排出効率を検討の上、決定した。



写真 3.1.3 エンドレスワイヤー

また、エンドレスワイヤーと後述のプーリー配置の変更から、ワイヤー破断時の取替え作業について、事前に検討を実施した。ワイヤーが破断した場合、図 3.1.1 に示す箇所を掘削後、ガイドパイプをサンダーで切断することで、先端のプーリーにワイヤーを掛け換えることを可能としている。また、刃口の中間の仕切りプレートは、写真 3.1.4 に示すように継目を設けることで、エンドレスワイヤーの取替えが容易に行うことができる。写真 3.1.5 に取替え状況を示す。

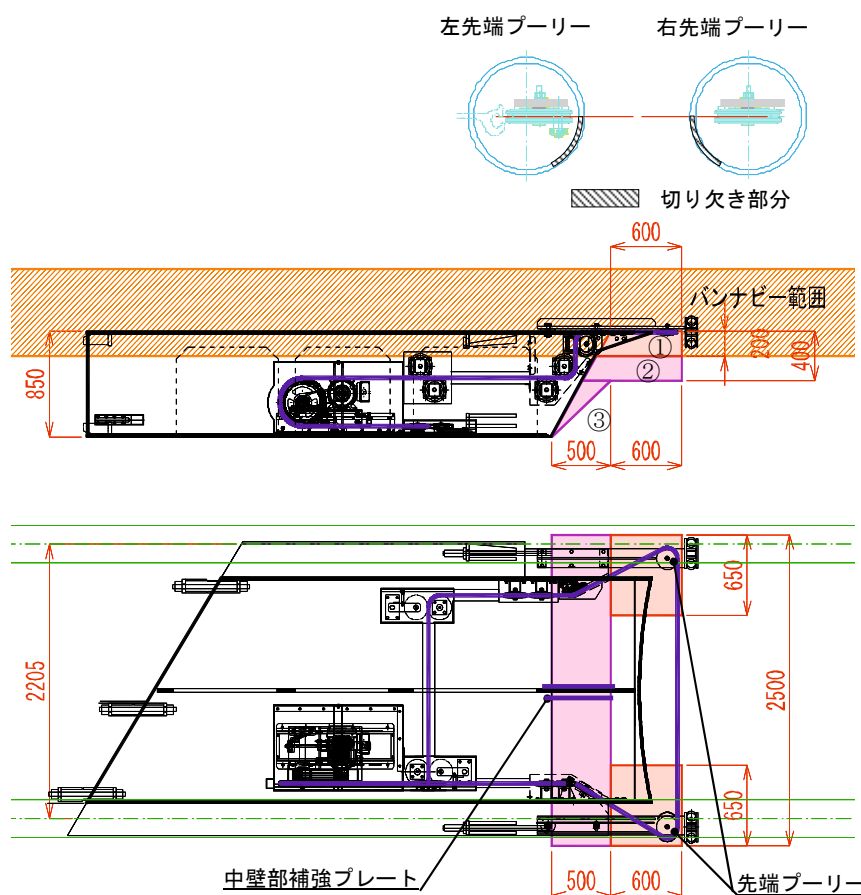


図 3.1.1 ワイヤー破断時掘削箇所



写真 3.1.4 刃口仕切り板継目部

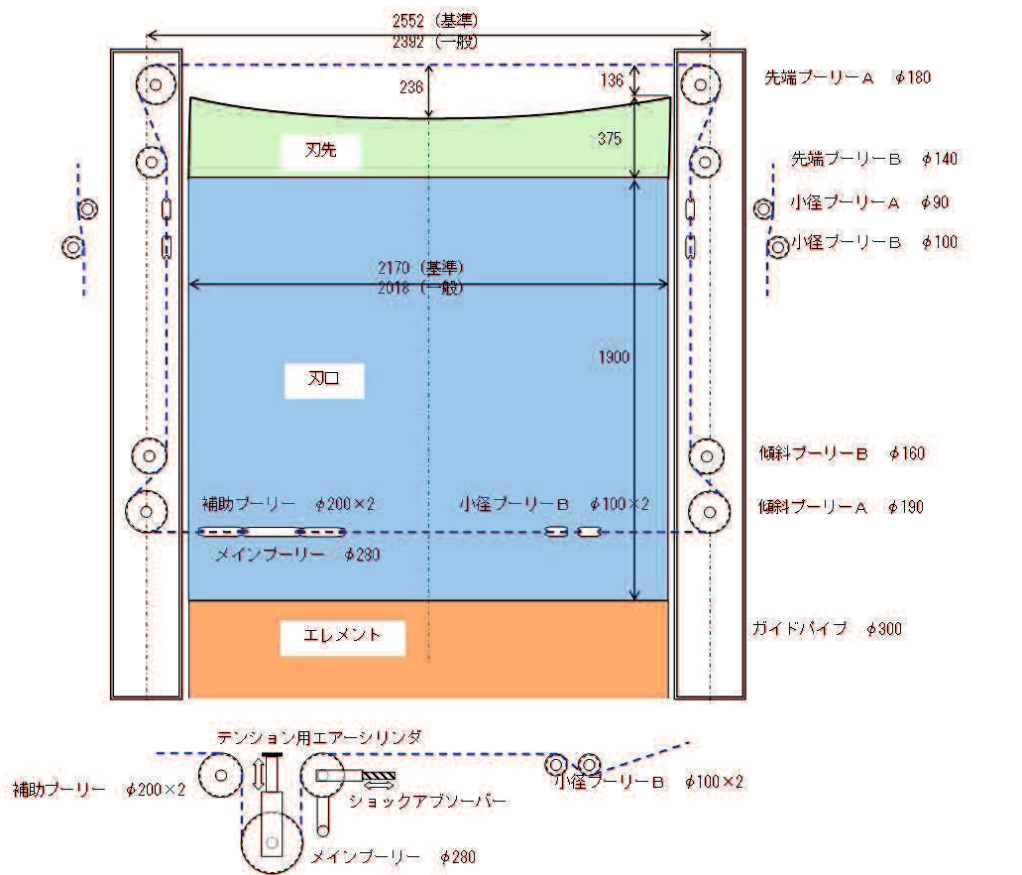


写真 3.1.5 刃口仕切り板継目部

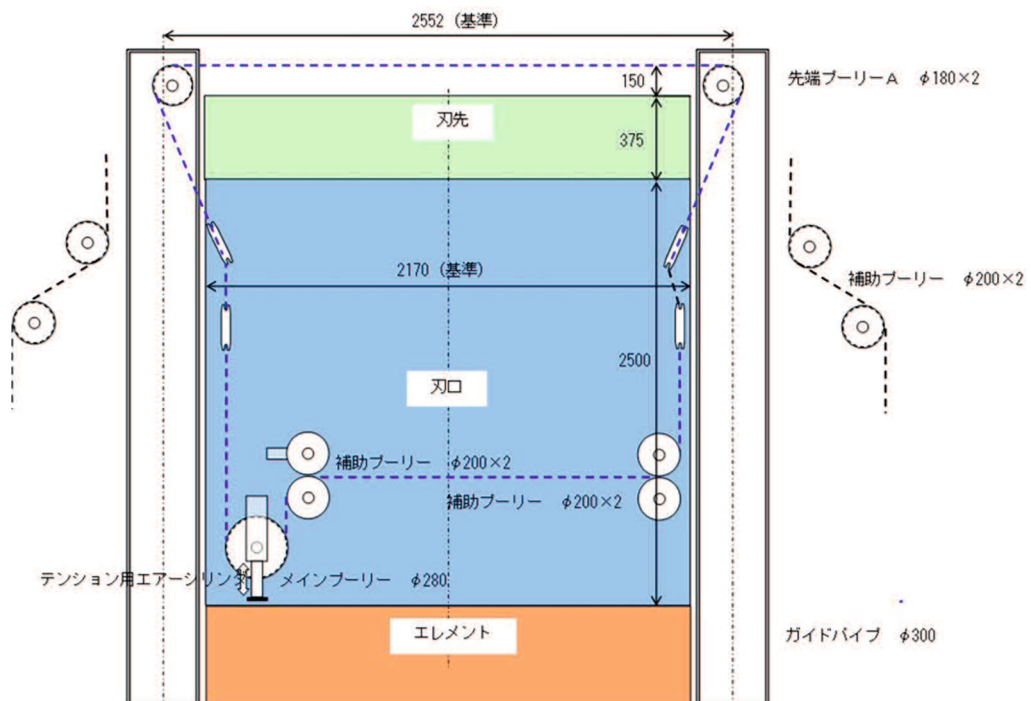
3.1.3 プーリーの磨耗・損傷対策

プーリーが磨耗・損傷した際、ガイドパイプ内のプーリーについては、交換が困難であった。また、径の違うプーリーが多く、予備品として、多くのプーリーを準備しておく必要があった。そこで、プーリーの配置を見直し、全体のプーリー数は 17 個から 11 個へ減少、ガイドパイプ内に配置するプーリーは 12 個から先端部の 2 個のみへと変更し、その他のものは、全て刃口内での交換を可能とした。

プーリー径も、ガイドパイプ内の先端プーリーは $\phi 180\text{mm}$ 、駆動プーリーは確実にワイヤーに回転力を与えられるよう $\phi 400\text{mm}$ とし、それ以外のものは $\phi 200\text{mm}$ に統一した。プーリーの材質についても、耐久性の観点より MC ナイロンからゴム製へ変更した。前回の実証実験時とのプーリー配置位置の違いを図 3.1.2 に示す。



(a) 前回の実証実験時のプーリー配置



(b) 変更したプーリー配置

図 3.1.2 プーリー配置の変更

3.1.4 姿勢制御のための対策

開発工法は、幅 2000mm を超えるエレメントを使用していることから、第 2 章に示したように、施工中にローリングが生じやすい傾向にあった。すなわち、図 3.1.3 に示すように、幅広のエレメントの片方の端部が、先行のエレメントと継手で連結されており、作用する鉛直土圧により継手のかん合していない側が下がりやすい。また、開発工法は、地盤切削ワイヤーで切削された地盤内の溝に、刃口上面のルーフ部を挿入することで、掘削断面上方の地盤のゆるみを抑えた状態で掘進することが可能である反面、エレメント下面の地盤反力係数が小さい場合、ローリングを抑制することが困難になる^{36), 37)}。

ローリングが顕著となった場合、その抑制、回復が困難であることから、エレメントを本体利用する場合は、本体構造の出来形寸法に影響を与え、必要な建築限界が確保できない事態となることも想定される。また、施工時については、

ローリングが顕著となった場合、図 3.1.4 に示すように、地山側のガイドパイプ内で、PC 鋼より線や先端プーリーがパイプ内面に接触し、施工の継続を困難とすることが想定される。また、ローリング傾向が顕著となると、その回復は困難となるため、刃口の高低方向の施工誤差は±20mm 程度を限界値とし、±10mm 程度で管理することを目標とした。

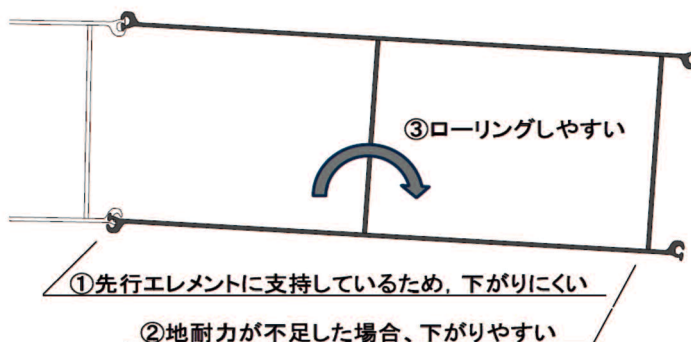


図 3.1.3 本工法で確認されたローリング事象

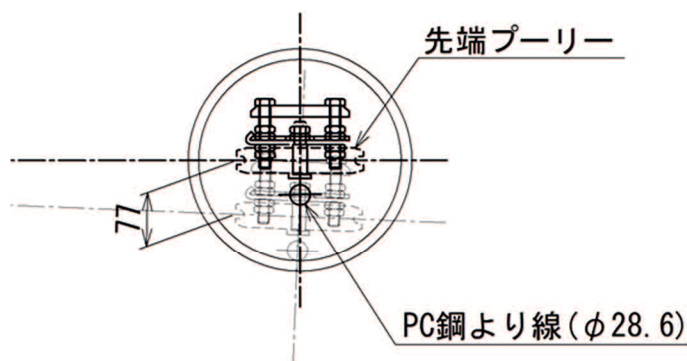


図 3.1.4 ガイドパイプと先端プーリーの位置関係

(1) ローリング対策

地盤の切削機構を有する刃口（以下、単に刃口という）の地山側が十分に地盤反力を得られない場合、そちら側へ刃口全体がローリングすることによって刃口はつり合いを保とうとする。そのため、図 3.1.5 に示すように、刃口下面の鋼板に水平に対して傾斜した部分（以下、テーパ部と呼ぶ）を設けて、下面全体をそりとして地盤反力を確保するよう改良した。また、このテーパ部により刃口の前面の断面を縮小することで、前方の掘削断面のうち下側の掘り残し量を調整し、姿勢制御を可能とした⁴¹⁾。

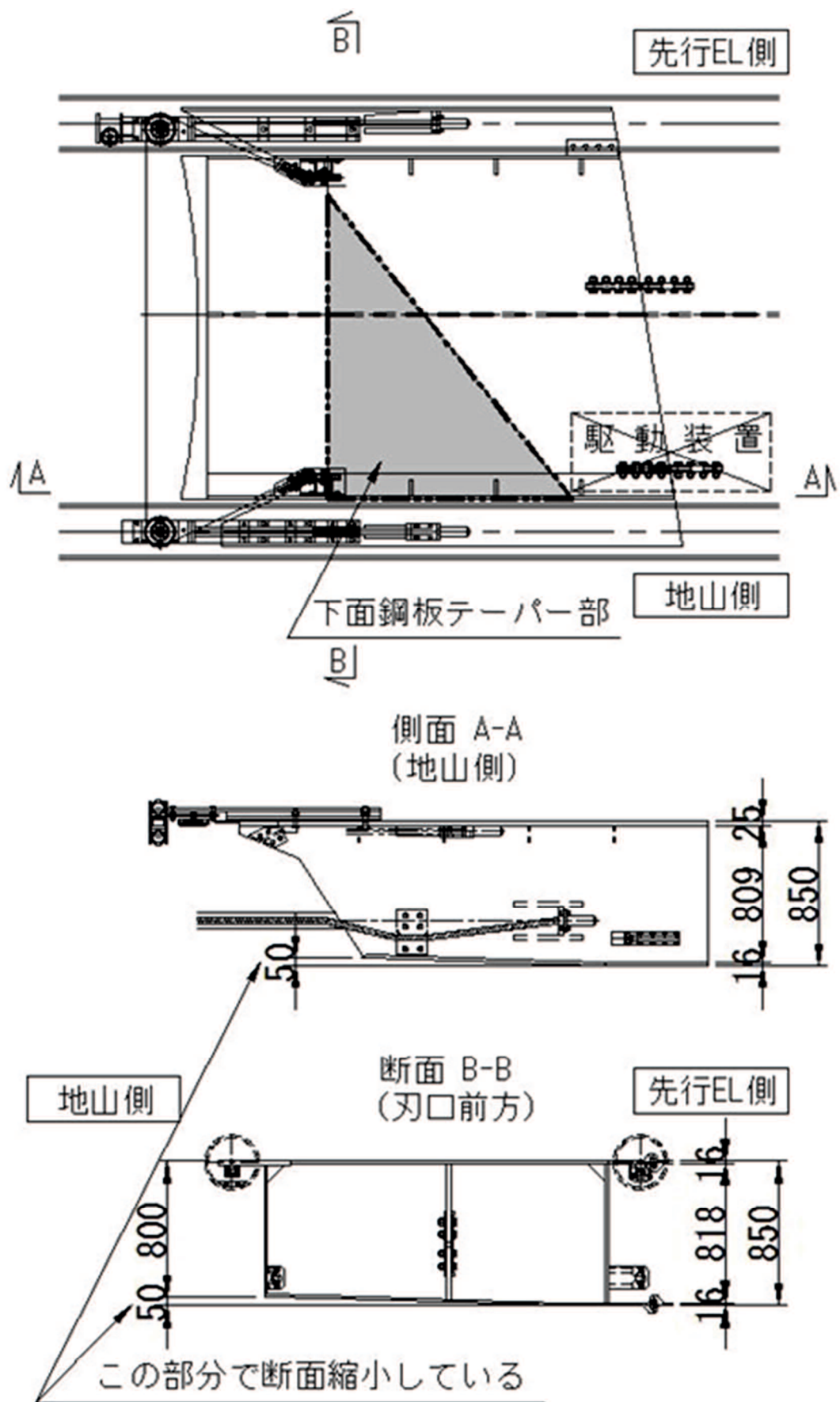


図 3.1.5 改良した刃口形状の概要

(2) 刃口の姿勢計測

また、刃口の姿勢制御で重要となる地山側の刃口高さについては、けん引掘進中にリアルタイムで把握する必要があるものと考え、写真 3.1.6 に示すように、刃口内部の地山側にレーザーセンサーを、エレメント後方の発進立坑内にローテーションレーザーを設置することとした。これにより、連続的に刃口の地山側の高さを計測し、中央管理室においてリアルタイムで刃口の挙動を把握することを可能とした。

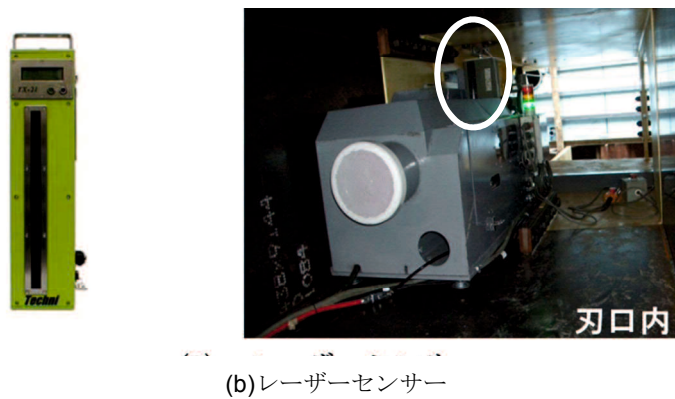
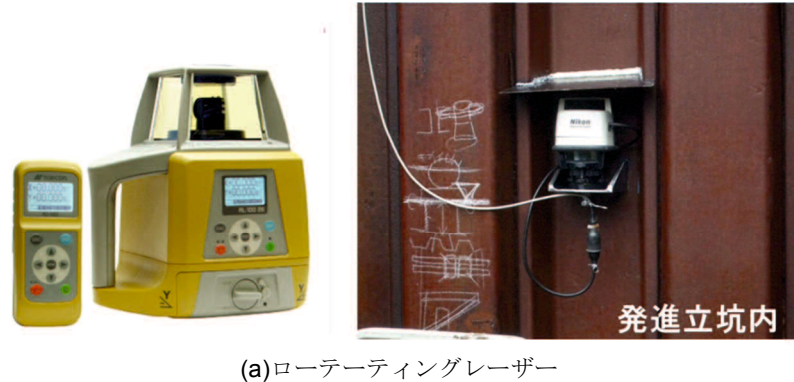


写真 3.1.6 刃口の姿勢計測機器

ここまで示した対策をもとに、地盤切削用刃口の再設計を行った。概要を図 3.1.5 に示す。

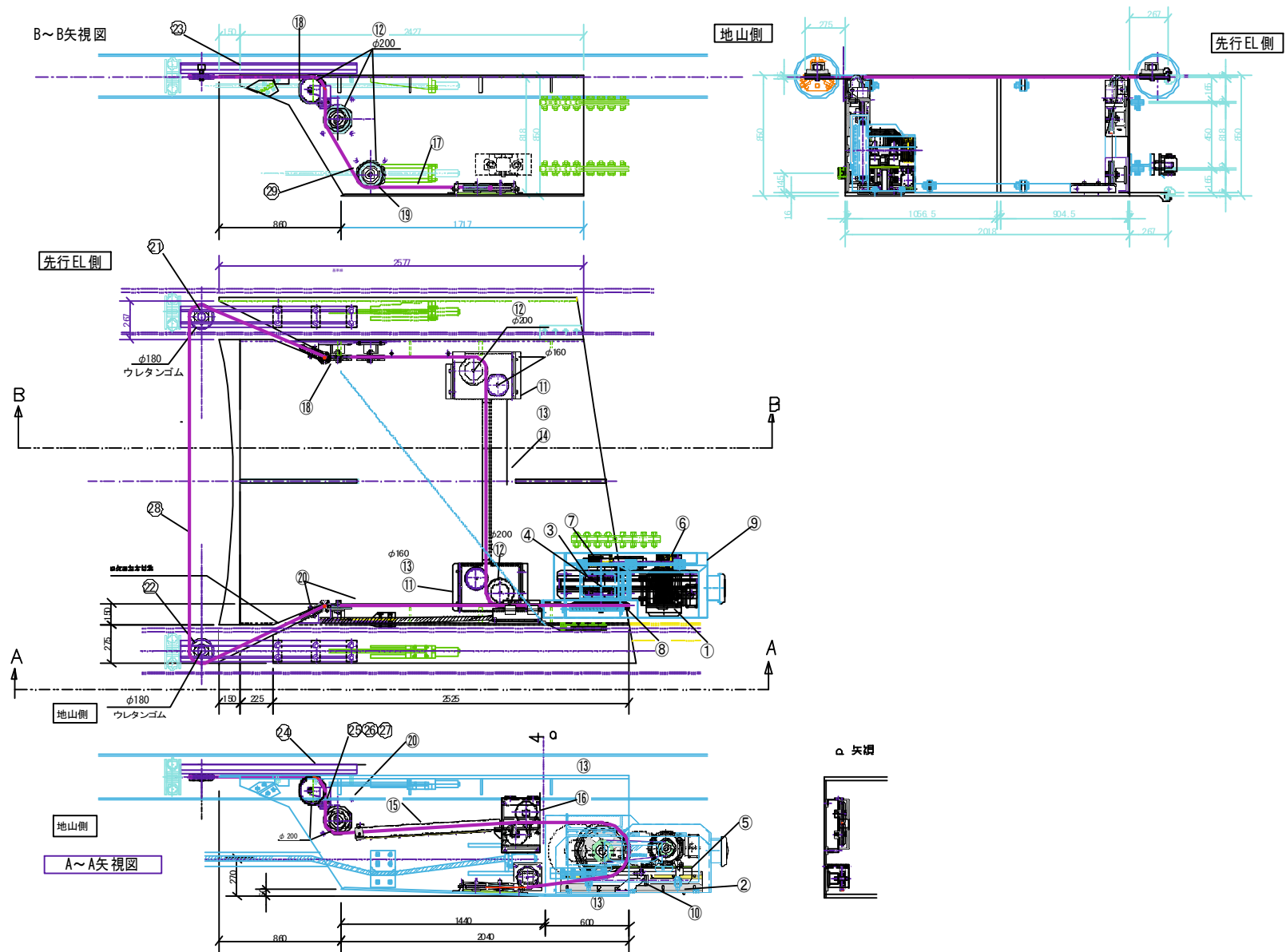


図 3.1.5 改良した地盤切削刃口 設計図

3. 2 実証試験Ⅱ

3.2.1 試験ヤード

図3.1.5に示した刃口および写真3.1.6に示した計測方法を用いて、再度、実物大エレメントの掘進実験を実施した。実験は、前回と同様、千葉県成田市の鉄建建設株式会社建設技術総合センター内の試験ヤードを使用して行った。ここには常設の発進・到達立坑がある。これを利用して、先行エレメントを模した継手をあらかじめ土中に埋設しておき、試験用エレメントをこの継手とかん合せながら、計画縦断勾配 $i=0.3\%$ の上り勾配として、掘進試験を2回実施した。1回の掘進延長は、掘削用刃口先端が到達立坑に達しないまでの距離として $L=20.0\text{m}$ とした。図3.2.1、図3.2.2および図3.2.3は、試験ヤードの概要を示したものであり、それぞれ平面図、縦断面図、および掘進箇所の横断面図である。

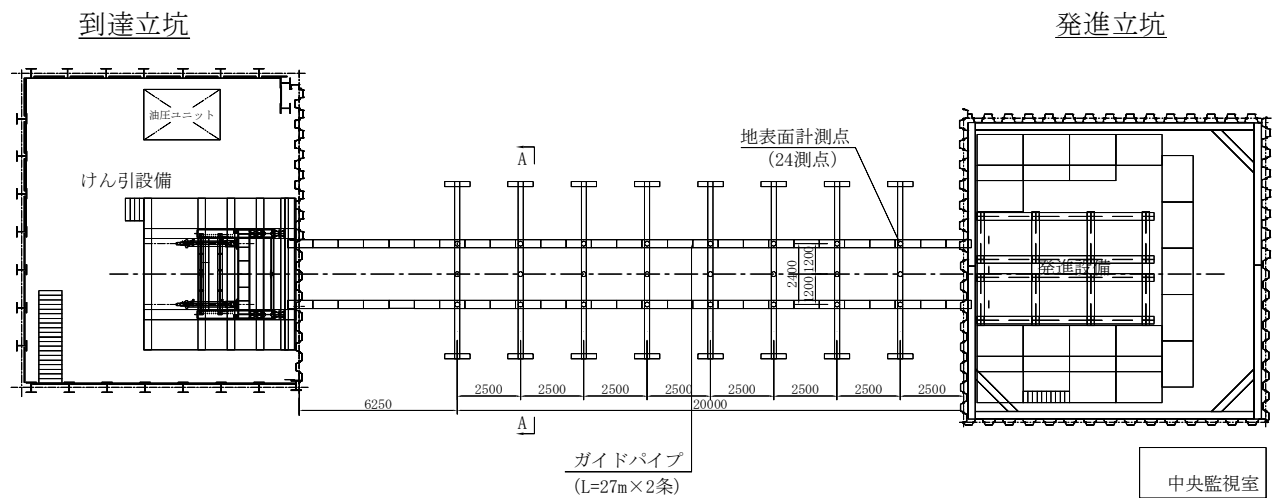


図 3.2.1 実験ヤード平面図

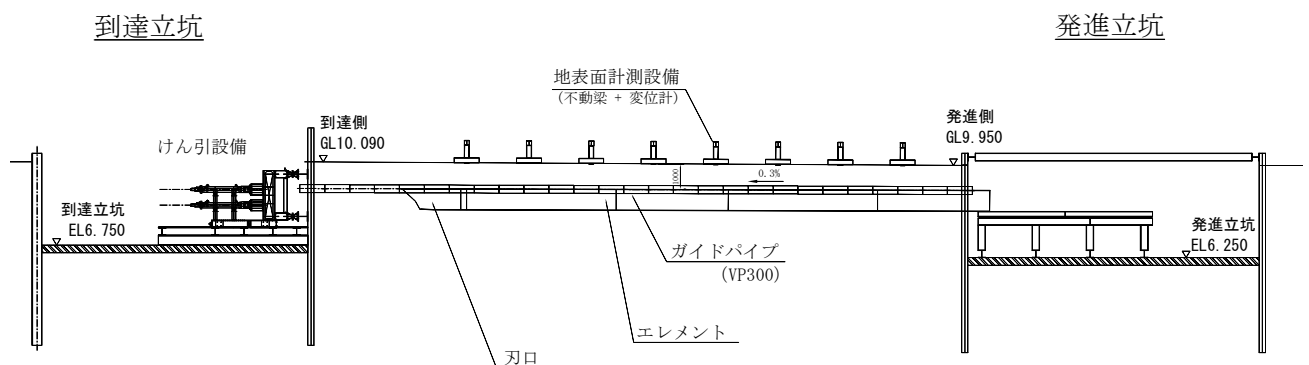


図 3.2.2 実験ヤード縦断面図

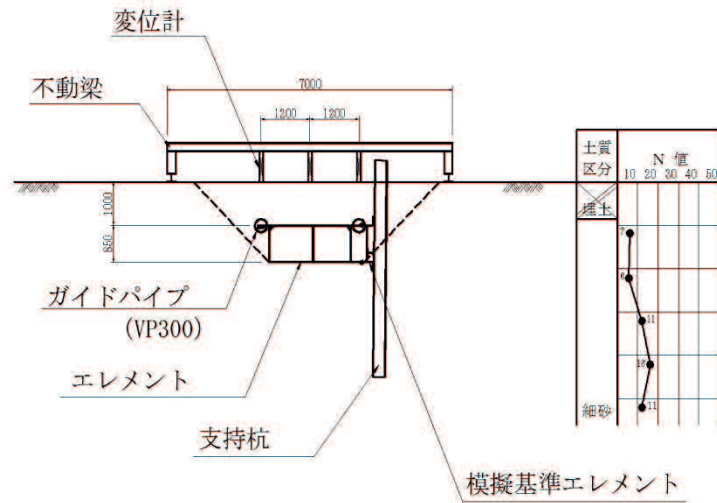


図 3.2.3 実験ヤード横断面図

開発工法は、既存の工法と同様に一般に土被りは小さく、埋土や沖積層、道路、鉄道盛土を対象とすることが多いため、本研究の試験においても土被りは約 1m とし、掘削対象土は砂質土とした。図 3.2.4 および表 3.2.1 は、試験ヤードで実施したふるいわけ試験の結果である。また、表 3.2.2 は試験ヤードの造成時に実施した小型 FWD 試験による地盤反力係数の計測結果を示している。小型 FWD 試験には $\phi 150\text{mm}$ の載荷板を用い、地盤反力係数は式(3.1)より算出した。

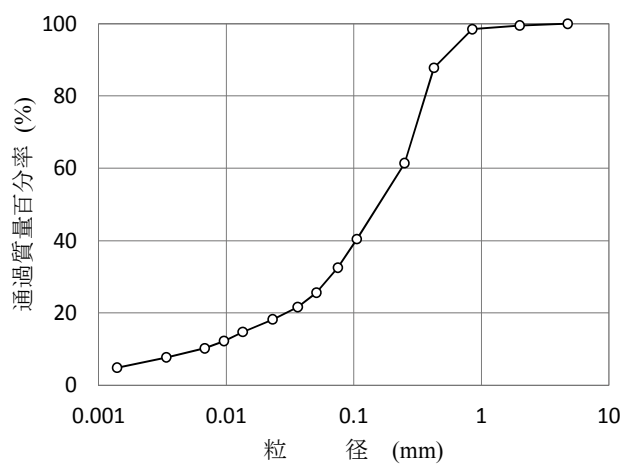


図 3.2.4 粒径加積曲線

表 3.2.1 試験ヤードの土質試験結果

項 目	単位	試験結果
分類名		細粒分質砂
土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.709
50%粒径 D_{50}	mm	0.1749
20%粒径 D_{20}	mm	0.0301
均等係数 U_c		37.18

表 3.2.2 試験ヤードの地盤反力係数

計測 位置		$p_{0.625}$ (MN/m ²)	$k_{p.FWD}$ (MN/m ³)	K_{30} (MN/m ³)
5m	左	0.103	82	55
	中	0.133	106	71
	右	0.112	90	60
10m	左	0.138	110	73
	中	0.092	74	49
	右	0.083	66	44
15m	左	0.140	112	75
	中	0.117	94	63
	右	0.114	91	61
20m	左	0.117	94	63
	中	0.095	76	51
	右	0.117	94	63

$$k_{p.FWD} = \left(\frac{p_{0.625}}{\delta_{0.625}} \right) \cdot \left(\frac{D_{15}}{D_{30}} \right) \quad (3.1)$$

ここに,

$k_{p.FWD}$: 小型 FWD による地盤反力係数 (MN/m³)

$p_{0.625}$: 変位量 0.625mm の時の載荷応力 (MN/m²)

$\delta_{0.625}$: 変位量=0.625 (mm)

D_{15} : 小型 FWD の載荷板の径=150 (mm)

D_{30} : FWD の載荷板の径=300 (mm)

である.

鉄道盛土の性能ランク III の上部盛土で規定される地盤反力係数 (K_{30} 値) は 70MN/m³ 以上である³⁸⁾が, 本研究で用いた模擬地盤は, これより若干締固め程度の悪い地盤である.

3.2.2 実験設備

刃口およびエレメントを設置する発進架台は, 計画掘進勾配と同じ $i=0.3\%$ の上りの一定勾配とした. エレメントのけん引には 1,200mm ストロークのセンターホール型 1000kN 油圧ジャッキ 4 基を用い, けん引架台によって, 到達側の土留め壁から反力を得る構造とした.

掘削は人力掘削を基本とし, 掘削作業員を 2 名, エレメント内に設置する排土用ベルトコンベアへの積込み作業員を 1 名, 計 3 名を刃口内に配置した. 写真 3.2.1, 3.2.2 に発進立坑および到達立坑の状況を示す.



写真 3.2.1 発進立坑設備状況

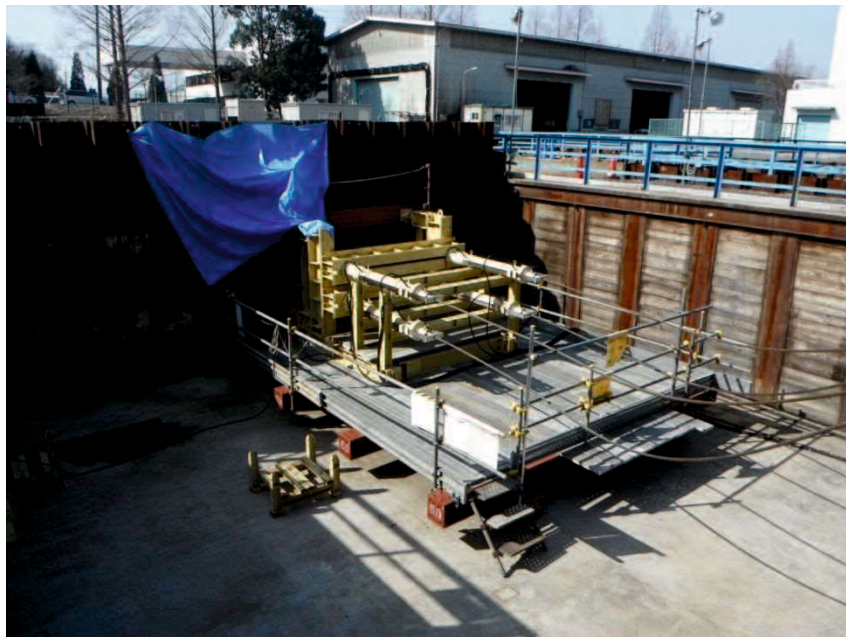


写真 3.2.2 到達立坑設備状況

3.2.3 実証試験Ⅱ結果（1回目）

1回目の掘進試験では、先行エレメントを模した継手は、計画縦断勾配に一致させた $i=3.0\%$ の上りの一定勾配となるように設置した。この試験は、あらかじめ掘削パターンを仮定しておき、けん引時の刃口の挙動を把握することを目的としたものである。ここでは、掘削パターンは、刃口底面のテーパーにより断面縮小された部分の掘り残し量を段階的に変化させることである。すなわち、刃口底面の地盤反力を最大にする必要がある場合は、図3.2.5の(a)に示すように、テーパ一部の地山を完全に掘り残して刃口断面どおりの掘削を行い、逆に地盤反力をあまり必要としない場合は同図の(b)に示すように、テーパ一部の地山を完全に掘りとりてしまい、後続のエレメントと同一断面の掘削を行うことである。掘進試験では、この2通りの掘削パターンで刃口の姿勢の変化を観察した。掘進手順は、まず、先端ルーフ内の前方250mm程度の刃口断面を人力により掘削し、その掘削が完了した後、エレメントを掘削分の距離だけけん引し、これを繰り返す方法で行った。図3.2.6は掘進距離ごとに選択した掘削パターンと、その際の刃口の姿勢の変化および掘進完了後のエレメント出来形（設置高さ）を示したものである。以下には姿勢制御の特徴的な箇所について詳述する。

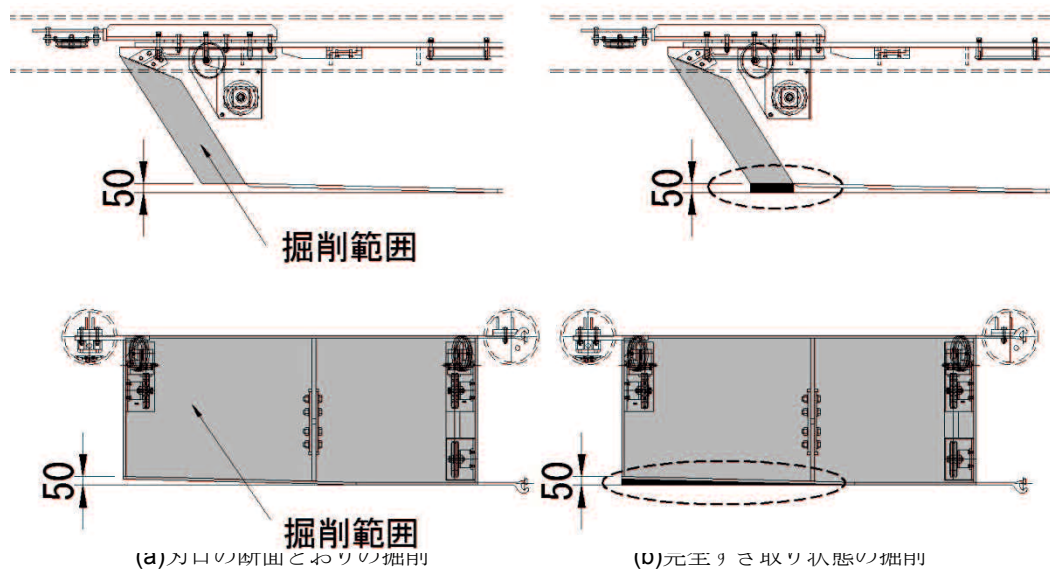


図 3.2.5 掘削パターン

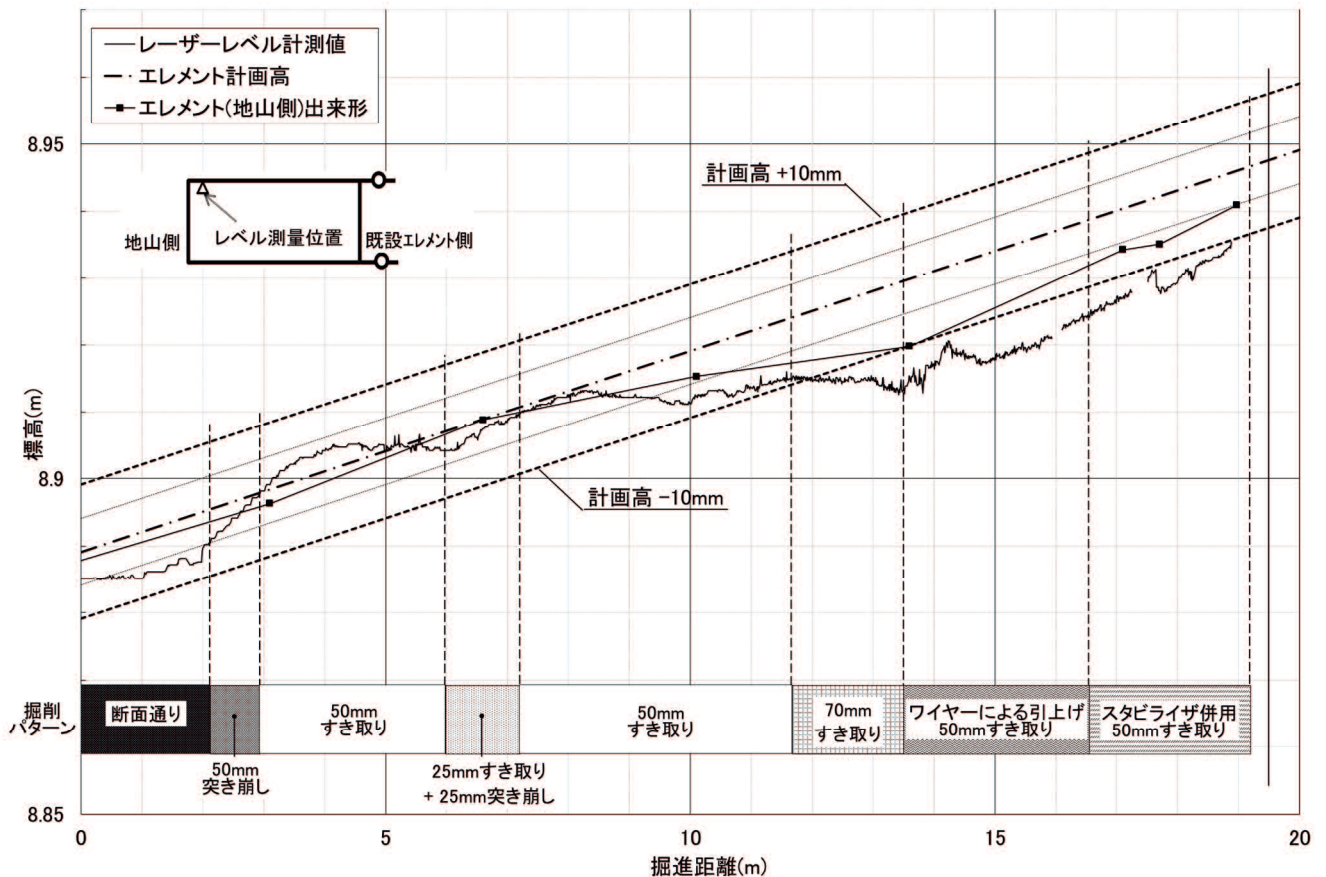


図 3.2.6 掘削パターンと刃口姿勢 (第 1 回)

(1) 発進～ $L=5\text{m}$ 区間における挙動

まず、刃口先端の断面どおり (すき取り量 0mm) の掘削パターンにより発進したが、計画高さに対して低くなる (ローリングが強まる) 傾向がみられた。これは、刃口が発進立坑の土留め壁を乗り越えて土中に入ったことにより発生したローリングであると考え、刃口高さの回復 (ローリングの解消) のため、断面どおりの掘削を続行した。その結果、刃口高さの回復が見られたため、掘削パターンを 50mm (エレメント断面分) 深さを突き崩すだけですき取らない方法で、地盤反力を弱めることとした。結果として、逆に急激な刃口高さの上昇傾向がみられたため、 50mm 分をすき取るパターンに変更した。これにより上昇傾向はおさまり、下降傾向がみられるようになった。

(2) $L=5\text{m} \sim 10\text{m}$ 区間における挙動

$L=5\text{m}$ 付近で、刃口はほぼ計画高さどおりであったが、下降傾向であったため、掘削パターンを 25mm すき取り、残りの 25mm を突き崩すパターンへと変更した。この変更によって、刃口の姿勢は上昇傾向に転じた。その後は、 50mm すき取りのパターンを選択して掘進を続行した。

(3) $L=10\text{m} \sim 20\text{m}$ 区間における挙動

$L=10\text{m}$ 付近では、刃口高さは計画高さに対して $7 \sim 8\text{mm}$ ほど低い状態で推移していたが、この後にけん引ワイヤーによる刃口の引き上げ実験を予定していたため、 50mm のすき取りから 70mm

のすき取りを続け、刃口高さを低めに保つこととした。けん引ワイヤーによる刃口引き上げは、刃口のけん引力を利用してローリング状態の解消を図る設備により行うもので、刃口に取り付けた4本のけん引用PC鋼より線のうち、地山側の下側の定着位置に、図3.2.7に示す治具を取り付けておき、刃口姿勢の急激な回復を図る場合に、PC鋼より線の上部のシリンダを押し下げることによってけん引方向を上向きにするものである。

$L=13\text{m}$ 付近からこのけん引ワイヤーによる刃口の引き上げ試験を実施した。掘削パターンは、引き上げ効果の確認のため、 50mm のすき取りとした。試験開始後、すぐに刃口は上昇傾向に転じたが、計画高さまでの回復を得るには至らなかった。

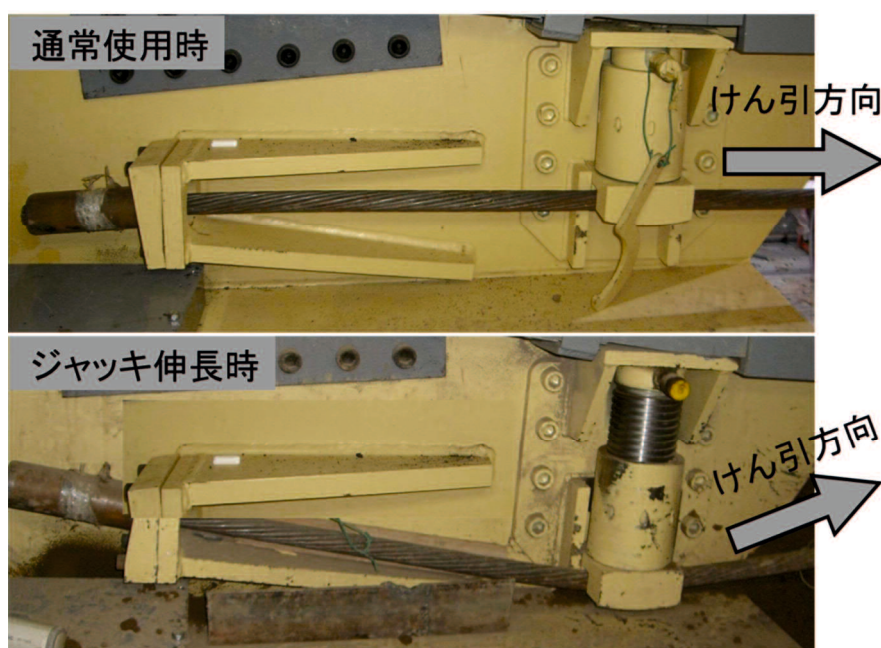


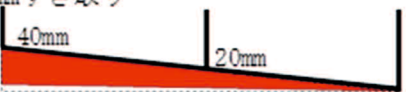
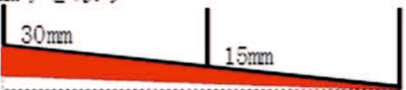


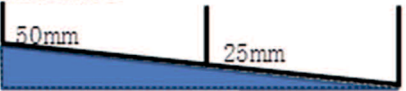


図 3.2.7 けん引ワイヤー引き下げ装置

3.2.4 実証試験Ⅱ結果（２回目）

(1)掘進パターンの変更

１回目の掘進結果から、テーパ部掘り残しの場合も完全すき取りの場合も、刃口の姿勢が急激に変化する傾向が認められたため、２回目の実証試験は、刃口テーパ部のすき取り量を10mmごとに細分し、毎掘進サイクルの最初にレーザーセンサーで計測した地山側の刃口高さと、計画高さの差により掘削パターンを選択する方法で行った。表 3.2.3 に、計測した刃口高さと計画高さの差から選択する掘削パターンを示す。

表 3.2.3 掘削パターン選定表

	前回けん引時の刃口の挙動	掘削パターン
下降 [2]	刃口高位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $6\text{mm} \leq \delta h < 3\text{mm}$	40mmすき取り 
下降 [1]	刃口高位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $3\text{mm} \leq \delta h < 0\text{mm}$	30mmすき取り 
上昇 [1]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $0\text{mm} \leq \delta h < -2\text{mm}$	20mmすき取り 
上昇 [2]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-2\text{mm} \leq \delta h < -4\text{mm}$	10mmすき取り 
上昇 [3]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-4\text{mm} \leq \delta h < -6\text{mm}$	50mm突き崩し 
上昇 [4]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-6\text{mm} \leq \delta h < -8\text{mm}$	25mm突き崩し 
上昇 [5]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-8\text{mm} \leq \delta h < -10\text{mm}$	断面通り 

(2) 継手設置の高さの変更

開発工法では、先に設置されたエレメント（先行エレメント）の継手をガイドとして刃口およびエレメントを掘進するため、先行エレメントが高さやローリングに関する施工誤差を有している場合、その後に掘進するエレメントがその影響を受けることとなる。2回目の掘進試験では、この先行エレメントの施工誤差による影響を打ち消しながら、計画高さを維持して掘進できることを確認するため、 $i=0.3\%$ の上り勾配を基本としながら、施工誤差を考慮して、先行エレメントを模した継手を、図 3.2.8 に示すように計画高さからずらした位置に設置した。また、この先行エレメントを模した継手の配置は、図 3.2.9 に示す範囲で徐々に変化させ、同様に戻す形とした。

図 3.2.9 は、掘進距離ごとに選択した掘削パターンとそれともなう刃口の姿勢の変化および掘進完了後のエレメントの出来形（設置高さ）を示したものである。以下には、姿勢制御の特徴的な箇所について詳述する。

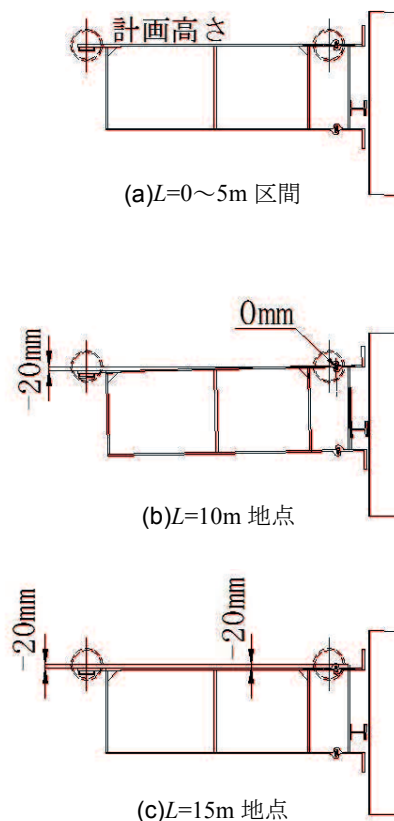


図 3.2.8 先行エレメント側の継手の配置図

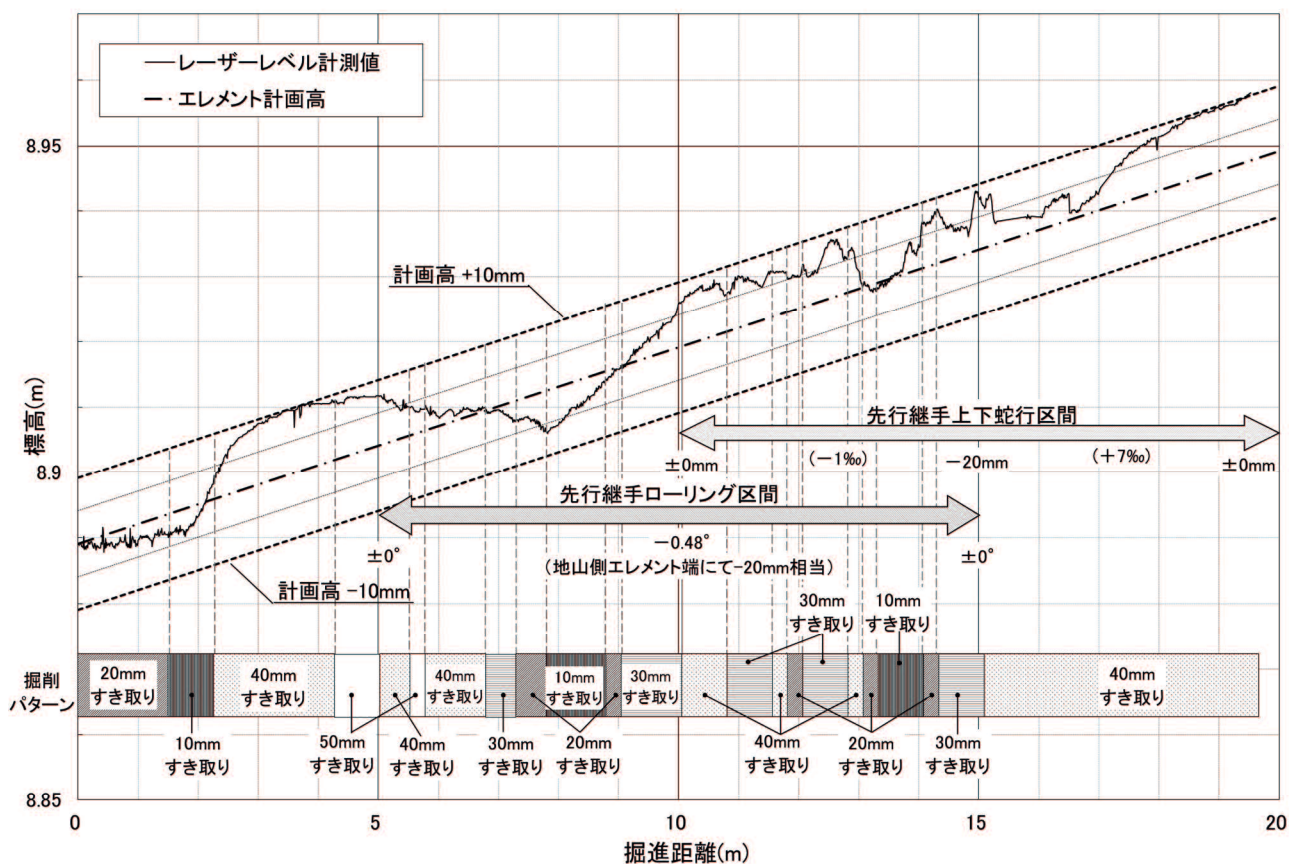


図 3.2.9 掘削パターンと刃口姿勢（第2回）

(3)発進～ $L=5\text{m}$ 区間における挙動

すき取り量 20mm の掘削パターンで発進したが、計画高さに対して、低くなる（ローリングが強まる）傾向が認められたため、すき取り量を 10mm に変更した。結果として、急激に刃口高さが上昇（逆ローリング）したが、これは、発進直後で後続のエレメントが発進立坑内にあったことから、刃口の姿勢の変化に対する後続のエレメントによる抵抗が小さく、すき取り量の減少に刃口の姿勢が敏感に反応したものである。その後は、すき取り量を $40\sim 50\text{mm}$ とし、刃口の上昇傾向を抑え、計画高さへの回復を図った。

(4) $L=5\text{m}\sim 10\text{m}$ 区間における挙動

$L=5\text{m}$ を超えてからは、計画高さに対して高めに推移していた刃口の下降傾向が認められた。また、先行エレメントの継手が、 $L=10\text{m}$ 地点に向けて、ローリングを増長させる（刃口高さが下降する）よう設置されているため、その影響が懸念された。しかし、掘削パターン表に従い、すき取り量を選択して掘進を進めたところ、 $L=7\sim 8\text{m}$ 付近で刃口高さはいったん計画高さを下回ったもののその後回復し、 $L=10\text{m}$ 地点では再び計画高さより高い位置まで上昇した。

(5) $L=10\text{m}\sim 15\text{m}$ 区間における挙動

この区間では、刃口高さは計画高さに対し、 $0\sim +10\text{mm}$ の間での変動を繰り返したため、掘削パターンをすき取り量 $10\text{mm}\sim 40\text{mm}$ の間で、細かく変更しながら掘進を進めた。

(6) $L=15\text{m}\sim 20\text{m}$ 区間における挙動

$L=15\text{m}$ 以降、すき取り量を 40mm とする掘削パターンを継続して選択した。その結果、 $L=15\text{m}$ 以降にいったんは刃口の下降傾向が認められたが、 $L=17\text{m}$ 以降には、刃口は再び上昇傾向を示し、計画高さに対し $+10\text{mm}$ 程度で掘進を完了した。これは、先行エレメントの継手自体が -20mm から 0mm への上り勾配で設置されていたことに加え、 $i=3.0\%$ の上り勾配が計画値であったため、これらを単純に重ね合わせると約 $i=3.4\%$ の上り勾配となり、十分な下降傾向が得られなかったものと考えられる。

3. 3 考 察

3.3.1 刃口の姿勢制御管理

開発工法で用いた幅広の刃口は、一方を継手がかん合しながら掘進するため、その姿勢制御は、刃口底面のテーパー部の掘削量の管理とリアルタイムでの刃口姿勢の計測を組み合わせで行った。このローリング対策を実施することで、高い精度でのエレメントの掘進を行なうことが可能になった。とくに、2回目の掘進試験では、直前の刃口高さと計画高さの差から、テーパー部の掘削のすき取り量を選択していくことで、計画高さから±10mm以内で刃口高さを制御することができた。

各掘削パターンにおける刃口の挙動を確認するため、掘削パターンを選択した後のけん引時に刃口高さがどのように変化するかを確認した。本研究で採用した姿勢制御方法では、ある時点で選択した掘削パターンによる刃口高さは、刃口が前進し、掘削箇所を刃口底面のテーパー部が通過すると変化する。これより、刃口高さの変化量は、選択した掘削パターンに対して、その後3サイクル進んだ（約750mm）時点での1掘進あたり変化量とした。この両者の関係をまとめたのが図3.3.1である。この図をみると、全体にバラつきは大きいですが、テーパー部のすき取り量を大きくするに従い、刃口は下降傾向を示すことがわかる。全体的な刃口の姿勢制御は、意図した方向への変化が得られていることから、このバラつきは、刃口の姿勢変化の応答が時間的に前後したことによるものと考えられる。また、後続のエレメントの設置高さは、ほぼ刃口の軌跡に追従して設置されていることから、刃口の掘進精度の向上が、エレメントの設置高さ、すなわち、出来形の精度の向上のために重要であることを確認した。

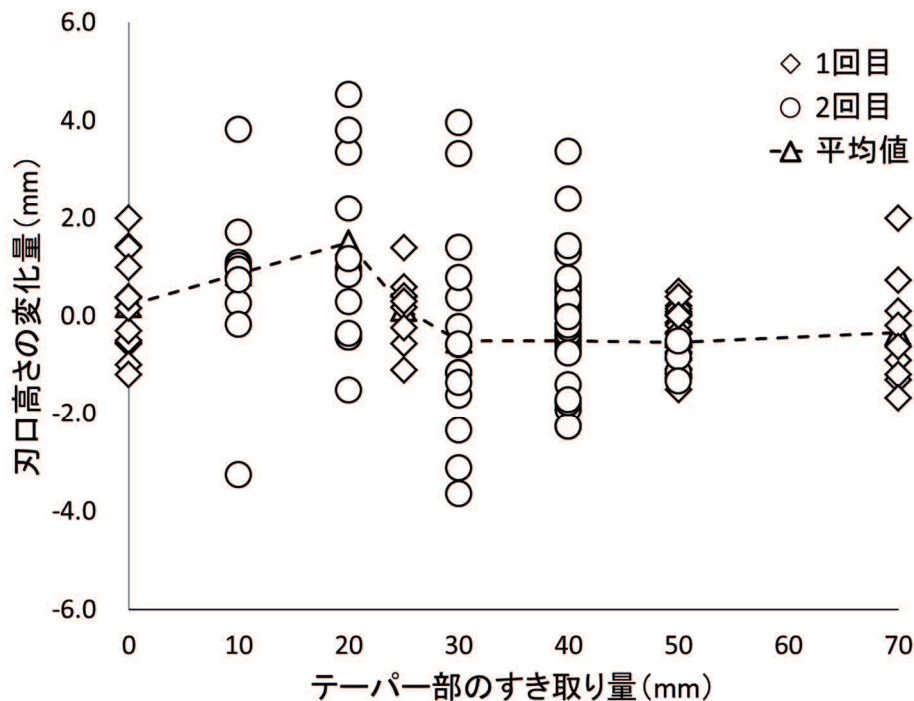


図 3.3.1 掘削パターンと刃口姿勢の変化

3.3.2 けん引力

実証試験により得られた掘進距離とけん引力の関係については、図 3.3.2 に、第 2 章と同じく式 (2.8)～(2.10)を用いた算出結果を予測値として併せて示した。けん引力の実測値は、全掘進延長にわたり、この予測値とほぼ一致している。このことは、地盤切削ワイヤーにより形成した切削溝に刃口の先行ルーフを確実に挿入することにより、刃口上面の地盤のゆるみを防止するとともに、切羽の安定を確保しながら切羽面の掘削することで、刃口の前面抵抗が、ほぼ 0 で掘進できたものとする。

前章で示した式(2.1a) ～ (2.1d)によりけん引力が示される、従来からの開放型の刃口を使用するエレメント掘進工法では、周面地盤のゆるみの防止と切羽の安定を確保するため、刃口の周面を掘削面の前方に貫入させながら掘進を行なっている。これに対して開発工法は、地盤切削ワイヤーで形成した溝に、刃口の先行ルーフを挿入するものであり、これによって刃口の貫入抵抗を低減できることを確認した。

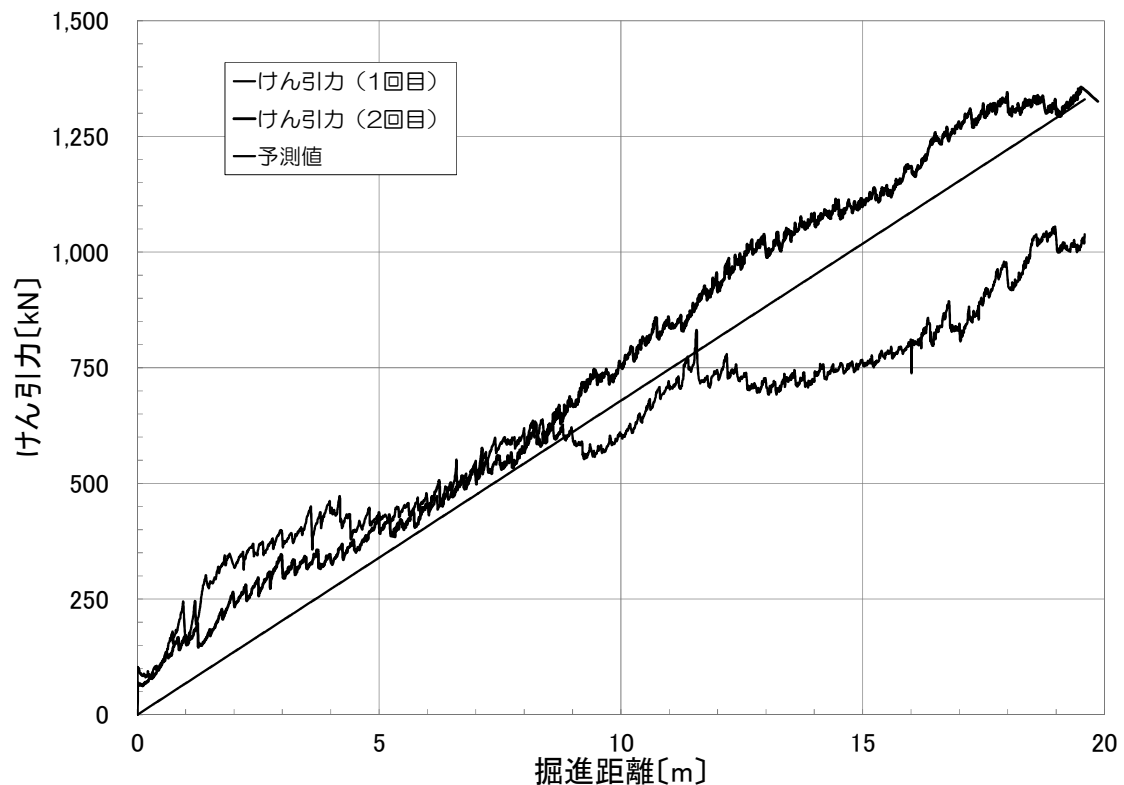


図 3.3.2 けん引力と掘進距離の関係

3.3.3 地表面の変位

本研究で行った実証試験では、発進立坑の土留め中心位置から 2.5m ピッチで地表面の鉛直方向変位を計測している。計測方法は、各測点にエレメントの掘進方向と直角方向に計測ばりを設置し、この計測ばりに取り付けた高感度変位計を用いて、地表面の変位量を計測するものである。エレメントの掘進方向の計測ラインは、エレメント中央部の直上とローリングなどで影響を受けやすい地山側のガイドパイプの中心位置の直上に設けた。図 3.2.1～3.2.3 にはそれらの計測位置を示している。

計測点での地表面変位のうち特徴的な計測結果は図 3.3.3(a)～(d)に示すとおりである。図中の地表面の変位量は、計測点に対し、刃口先端部の掘進に伴う相対的な位置関係に対する値を示している。この図をみると、刃口中央部の計測点は、刃口の先端の通過前後から隆起傾向を示し、刃口の通過後には若干沈下する傾向を示していることがわかる。これに対し、地山側のガイドパイプの直上では、先行して隆起する傾向はあまりみられないが、刃口先端の通過後に沈下傾向を示すところは共通している。

刃口の姿勢と地表面変位との関係をみると、例えば、1 回目の掘進試験では、 $L=5.0\text{m}$ 前後では刃口のテーパ部のすき取り量を 50mm としているのに対し、 $L=12.5\text{m}$ では、70mm のすき取り量としているが、 $L=12.5\text{m}$ では地表面が隆起する傾向はほとんど認められない。また、2 回目の掘進試験では、 $L=2.5\text{m}$ 前後でテーパ部のすき取り量を 40mm としているのに対し、 $L=12.5\text{m}$ 前後では 30mm としているが、すき取り量の違いが地表面変位量に与える影響に大きな違いは認められなかった。

全体的には、一般的にシールド工法や推進工法でみられる先行隆起や後続沈下によると思われる変位が確認されたが、地表面の変位量は $\pm 3\text{mm}$ 程度と小さい値で推移しており、実工事において、上部の交通に有害な影響を与えるものではないことを確認した。これは地盤切削を併用した効果と思われる。すなわち、掘進が刃口上方に余掘りがほとんどない状態で行われ、上方への地盤のゆるみが最小限に抑えられたことによると思われる。一方で、刃口の掘進にともない、刃口上面の摩擦により、前方に土塊が押し出される作用により、いくらかの先行隆起が生じた。また、後続沈下も同様に、地盤のゆるみによって生じるというよりは、刃口通過後、先行隆起分がもとに戻ることに発生したものと考えられる。

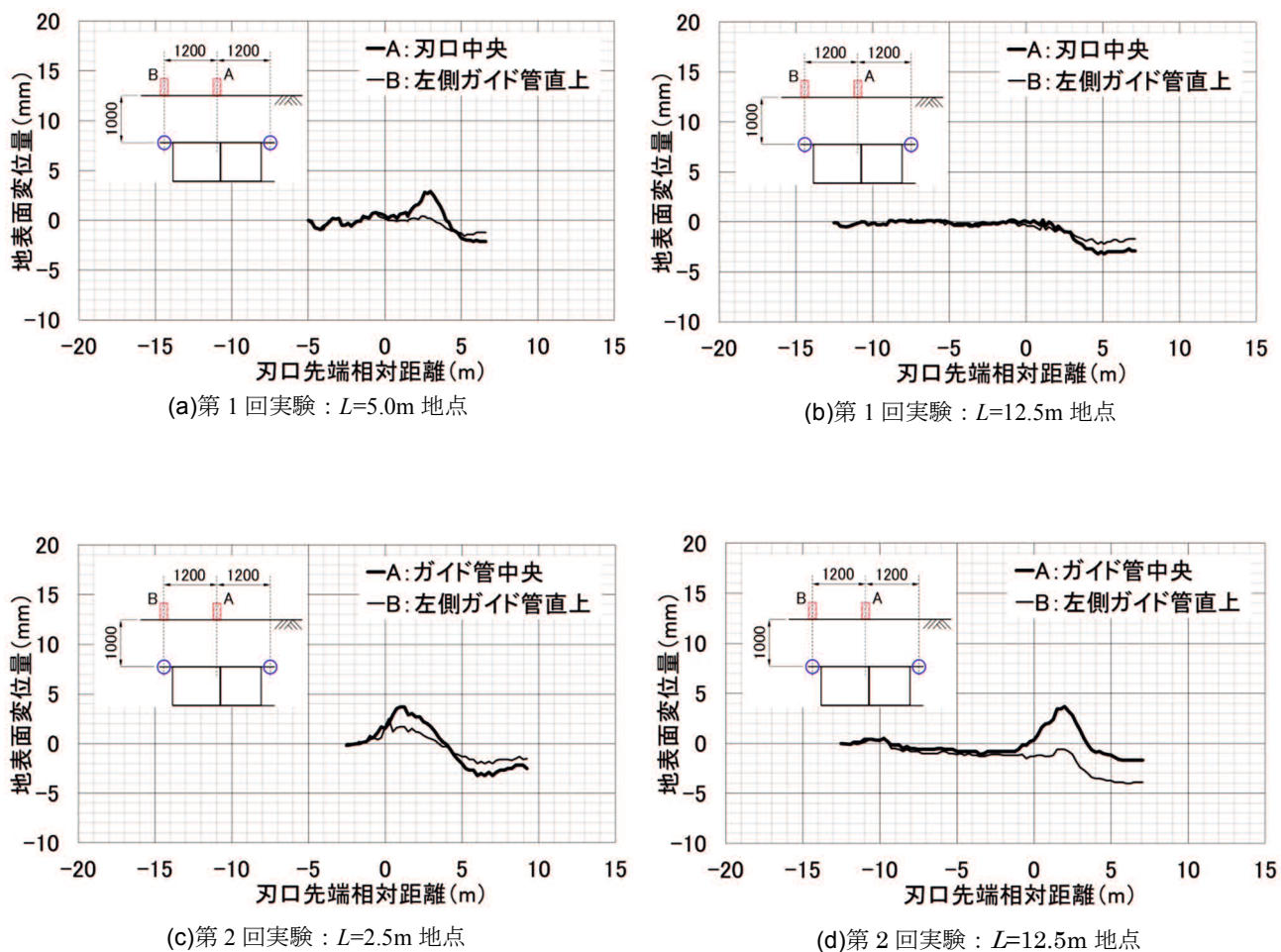


図 3.3.3 刃口の掘進位置と地表面変位との関係

3.3.4 総 括

前回の実証試験Ⅰの課題解決のために、地盤切削用刃口をはじめ、地盤切削機構の大幅な改良を行った。結果として、地盤切削ワイヤーの破断はなく、モーター関係のトラブルも皆無であった。プーリーについても、多少の磨耗が発生したため、1回目終了後、すべてのプーリーを交換したが、2回目の掘進においても途中でのプーリーの交換は必要なく、地盤切削機構の耐久性と実用性を確認した。

幅広エレメントの姿勢制御、掘進精度を向上させるためには、掘進中のローリング対策を実施することが重要であり、刃口部分の姿勢をリアルタイムで計測し、その結果に応じて、掘削パターンを選定することで、きめ細かく制御できることを確認した。今後、土質や土被り等の条件が異なる場合は、施工導入時に、各掘削パターンにおける刃口姿勢の応答を確認し、その後の施工に対する刃口姿勢と掘削パターンの組み合わせを決定することで対応できるものとする。

けん引力については、実証試験の範囲において、従来の工法に対し、刃口先端の貫入状況の違いにより、総けん引力が低減できることを確認したが、土質が異なる場合については、別途確認が必要である。

エレメントの掘進精度は、掘進が地表面に与える影響に直接関係している。このため、本実証実験では、地盤切削機構を併用したが、これが刃口上方の地盤のゆるみを低減し、地表面への影

響を抑制できることが確認された。また、地盤の先行隆起量や後続沈下量は、刃口下面のテーパ一部のすき取り量に関係しており、本実証試験では、刃口の姿勢制御を優先させた場合に、先行隆起量やそれともなう後続沈下量が大きくなる傾向が認められたが、実用性には問題ない範囲であった。

3. 4 まとめ

本章において、改良型エレメント掘進工法の実用性を、実物大の実証実験から検討した結果をとりまとめた。

この一連の実証実験から得られた知見を以下に示す。

- a) 駆動モーターのトラブル対策として、油圧モーターから電動モーターへの変更を行い、駆動系のトラブルなくエレメント掘進可能であることを確認した。
- b) プーリーの磨耗・損傷対策として、プーリーの必要数を最小限として、そのほとんどを交換の容易な刃口内に配置し、材質も耐久性に優れるゴム製に変更した。結果として、 $L=20\text{m}$ の掘進において、途中での交換なく掘進可能であることを確認した。
- c) 切削ワイヤーをジョイントを有しないエンドレスワイヤーに変更し、またプーリーの直径を $\phi 200\text{mm}$ に統一することでワイヤーの曲げ半径を大きくしたことで、ワイヤーの破断に対する耐久性を向上し、 $L=20\text{m}$ の掘進において、途中での交換なく掘進可能であることを確認した。
- d) 幅広のエレメントの掘進精度を向上させるためにはローリング対策を実施することが重要であり、刃口姿勢の計測と掘削方法を組み合わせることによる刃口の姿勢制御方法が確立できた。
- e) 地盤切削ワイヤーで形成した土中の溝に刃口の先行ルーフを挿入していくことで、刃口の貫入抵抗を低減することを可能とした。
- f) 本工法は、貫入抵抗を低減することにより、掘進による周辺地盤への影響低減を図ることが可能であり、さらにはエレメント上面の余掘りをほぼなくすことにより、地表面への影響を軽微とすることが可能であることが確認できた。

第4章 施工実績

4. 1 工事概要³⁹⁾

4.1.1 事業概要

JR 高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋（以下、「二ツ家 Bv」という）は、圏央道（首都圏中央連絡自動車道）と JR 高崎線の交差部に位置し、事業主体である国土交通省から設計・施工に関して委託を受けた JR 東日本が監督管理を行ない、鉄建・鹿島・佐藤共同企業体が施工を担当した（図 4.1.1, 4.1.2）。



図 4.1.1 高崎線桶川北本間二ツ家こ道橋新設工事³⁹⁾

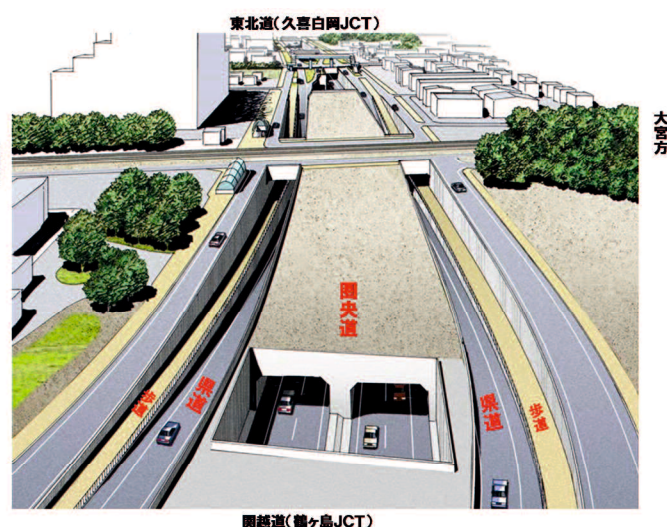


図 4.1.2 完成イメージ³⁹⁾

4.1.2 構造物概要

当該箇所は、圏央道とそれに並行する県道および歩道がひとつのボックスカルバートでJR線と最小土被り1.4mで交差する。基本設計において、HEP&JES工法が選定されており、主な諸元は以下に示すとおりである。また、図4.1.3、図4.1.4にそれぞれ断面図、縦断面図を、図4.1.5にHEP&JES工法による仮設状態での断面図と今回の開発工法の適用範囲を示す。

構造形式：1層4径間ボックスカルバート（HEP&JES工法）

構造寸法：幅49.0m，高さ8.9m，延長16.2m（立坑土留め間：14.0m）

土被り：施工基面（F.L.）より1.4m

地下水位：F.L. -4.3m（H.W.L.）

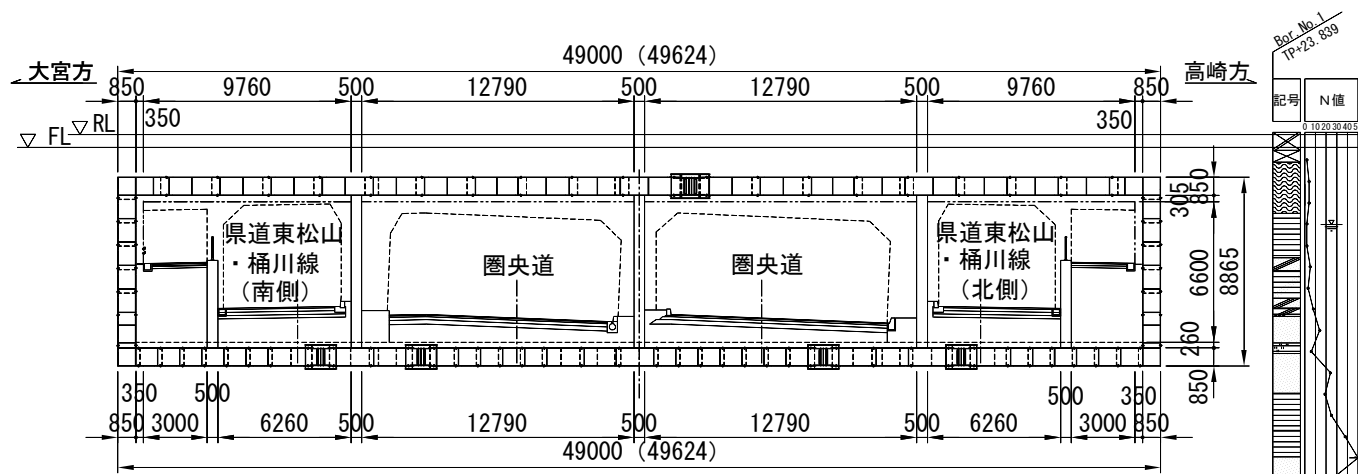


図 4.1.3 ツ家 Bv 断面図

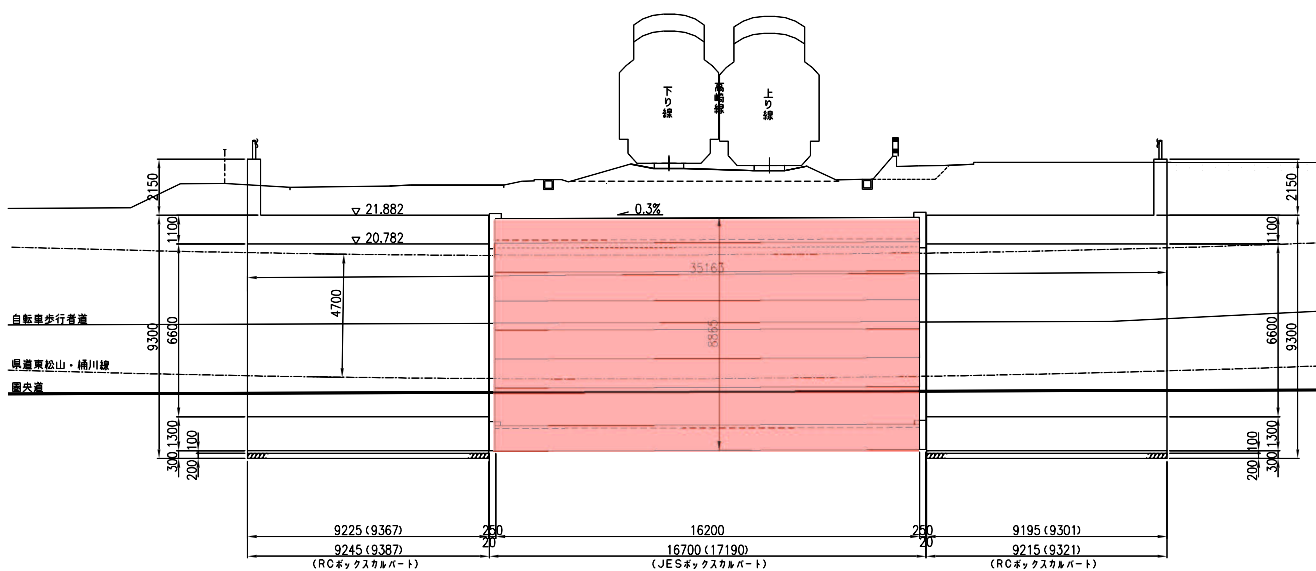


図 4.1.4 二ツ家 Bv 側面図

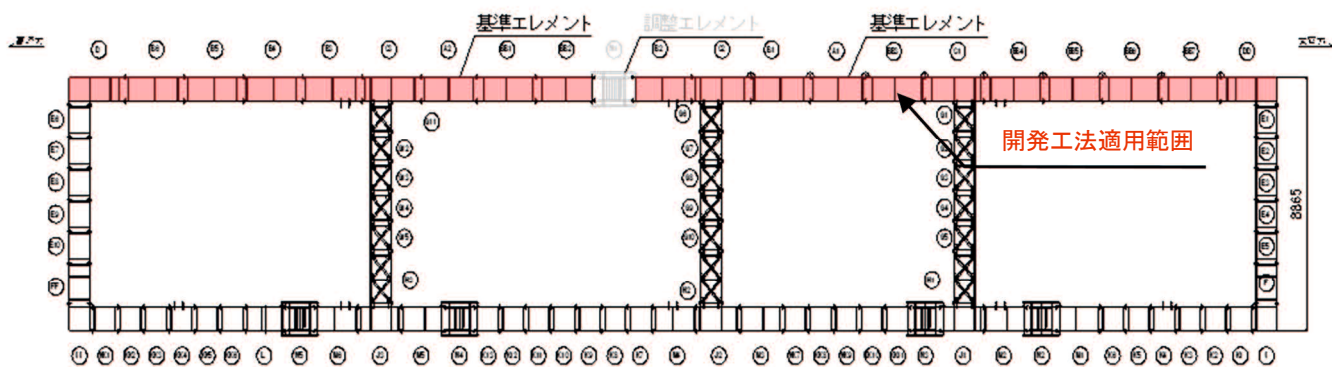


図 4.1.5 開発工法適用範囲

4.1.3 施工ステップ

当該アンダーパスの施工ステップを以下に示す。

(1) 立坑構築

線路を挟んだ両側に発進立坑・到達立坑をそれぞれ構築する。

(2) 上床版エレメント施工

上床版エレメントは、基準エレメントを施工後、4班施工とする。最終的に中央部は、左右の施工誤差を吸収できる調整エレメントにより連結し、継手グラウト、中埋めコンクリートを打設する。

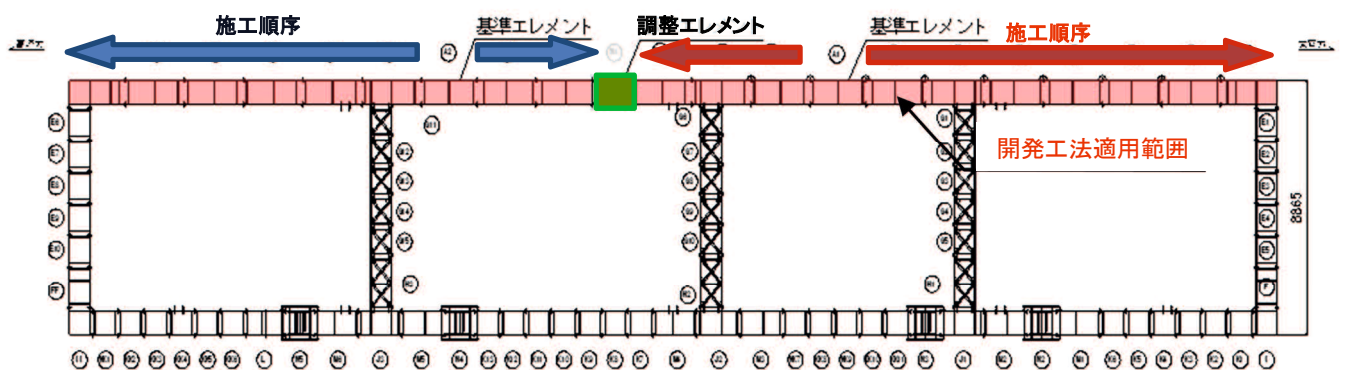


図 4.1.6 施工ステップ図（上床版エレメント）

(3) 側壁・仮壁エレメント施工

側壁・仮壁エレメントは、昇降架台を使用し、それぞれ上方から下方へ順次施工を行う。こちらについても、エレメント施工完了後、継手グラウト、中埋めコンクリートを実施する。

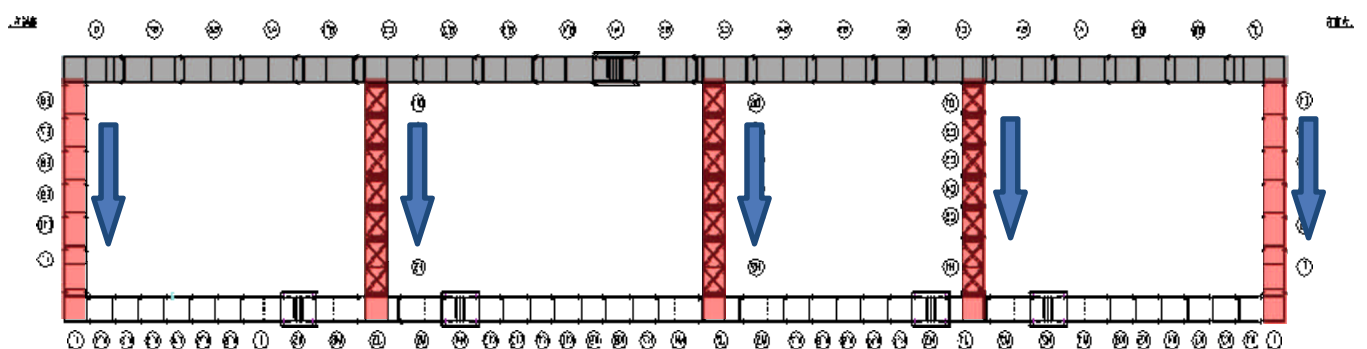


図 4.1.7 施工ステップ図（側壁・仮壁エレメント）

(4) 下床版エレメント施工

下床版エレメントは、側壁・仮壁エレメントとかん合させながら施工を行う。閉合部はそれぞれ調整エレメントにより、左右の誤差を吸収する。

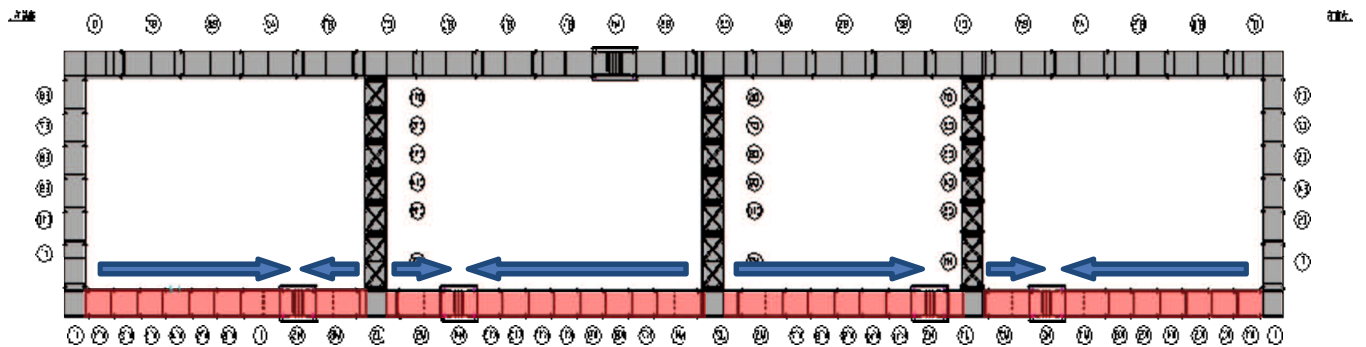


図 4.1.8 施工ステップ図（下床版エレメント）

(5) 函体内掘削

エレメントが構造体として機能しているため、内部掘削による上部交通への影響はない。

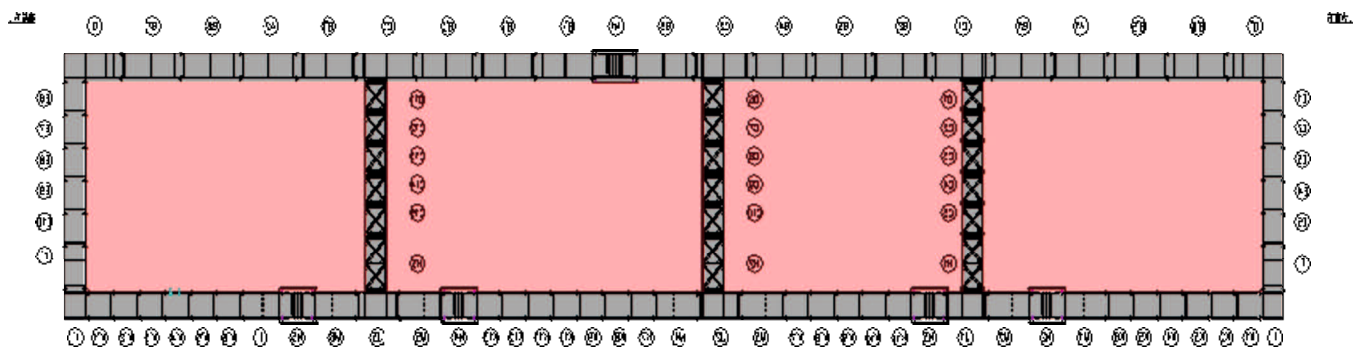


図 4.1.9 施工ステップ図（函体内掘削）

(6) 中壁構築

正規の位置に中壁を構築する。中壁の主鉄筋は、あらかじめエレメント内に配置されている定着鉄筋と機械式継手で連結する。中壁構築後、仮壁エレメントの撤去を行う。仮壁エレメントは撤去を考慮して内部にコンクリートを打設せず、トラス構造により軸力を負担する構造としている。

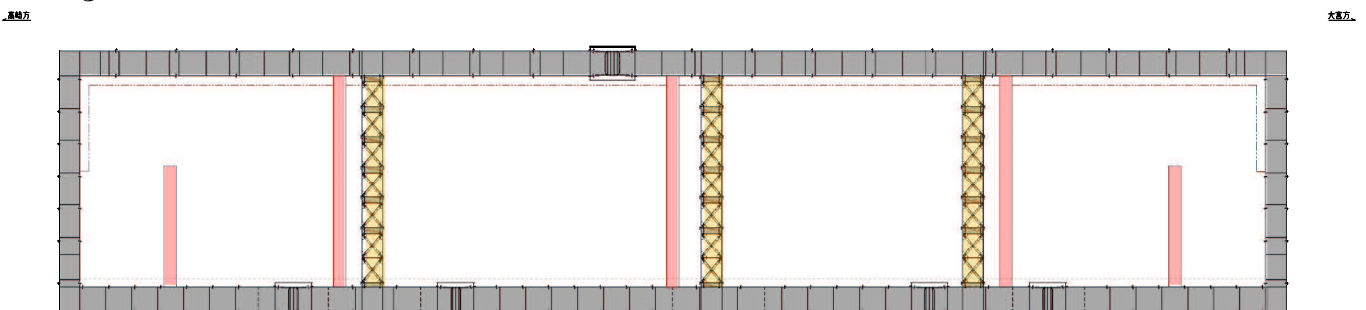


図 4.1.10 施工ステップ図（中壁構築）

4.1.4 施工条件

当該線区は、夜間の線路閉鎖間合いが上り線218分（0：27～4：05），下り線249分（0：42～4：51）と非常に短い．さらに、二ツ家Bvは上床版エレメントの施工数量が多いことから、エレメント掘進を線路閉鎖間合いで施工した場合、工期の長大化が顕著であった．また、北本方には隣接して現県道が高崎線と交差する二ツ家踏切があり、アンダーパス施工中の軌道変位をできるだけ小さくすることが求められた．

圏央道の早期開通のため、工期短縮が求められていたことから、当該箇所の上床版の施工について、開発工法の適用を検討した．

その結果、上床版エレメントのうち、基準エレメント2箇所を含む20のエレメントに開発工法を適用するものとし、中央に両側のエレメントの施工誤差を調整するための調整エレメントを設けている．

構造物には、排水性を考慮してトンネル縦断方向に0.3%の縦断勾配が設けられており、エレメント掘進は発進より0.3%の勾配で上向きに掘進する計画とした．図4.1.11にボーリング調査における上床版付近の土質条件を示す．調査結果では、N値2～3程度のローム層と推定されていたが、エレメント掘進時に確認した土質では、上半分程度は埋土であり、部分的に100～200mm程度の玉石が混在していた．

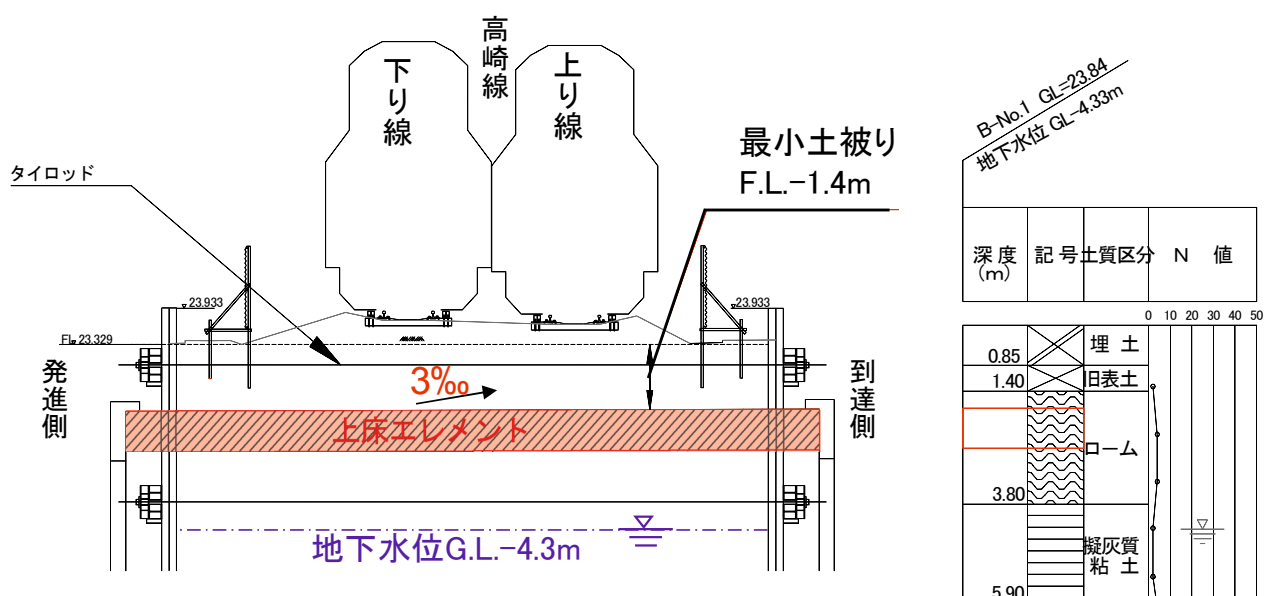


図 4.1.11 上床版エレメントの土質条件

4.2.1 作業時間帶

まず、ステップ1として、基準エレメントについては軌道影響範囲の掘進については、全て夜間線路閉鎖間合いでの施工とした。次にステップ2としてその両側のエレメントについては、作業開始時間を若干早め、数本の列車の通過による影響を確認しながら掘進を行った。この2つのステップにおいて、開発工法のエレメント掘進による軌道への影響が軽微であることを確認した後、ステップ3である昼夜施工へと移行することとした。図4.2.1～4.2.3に各ステップでの掘進距離に応じた作業時間帯を示す。

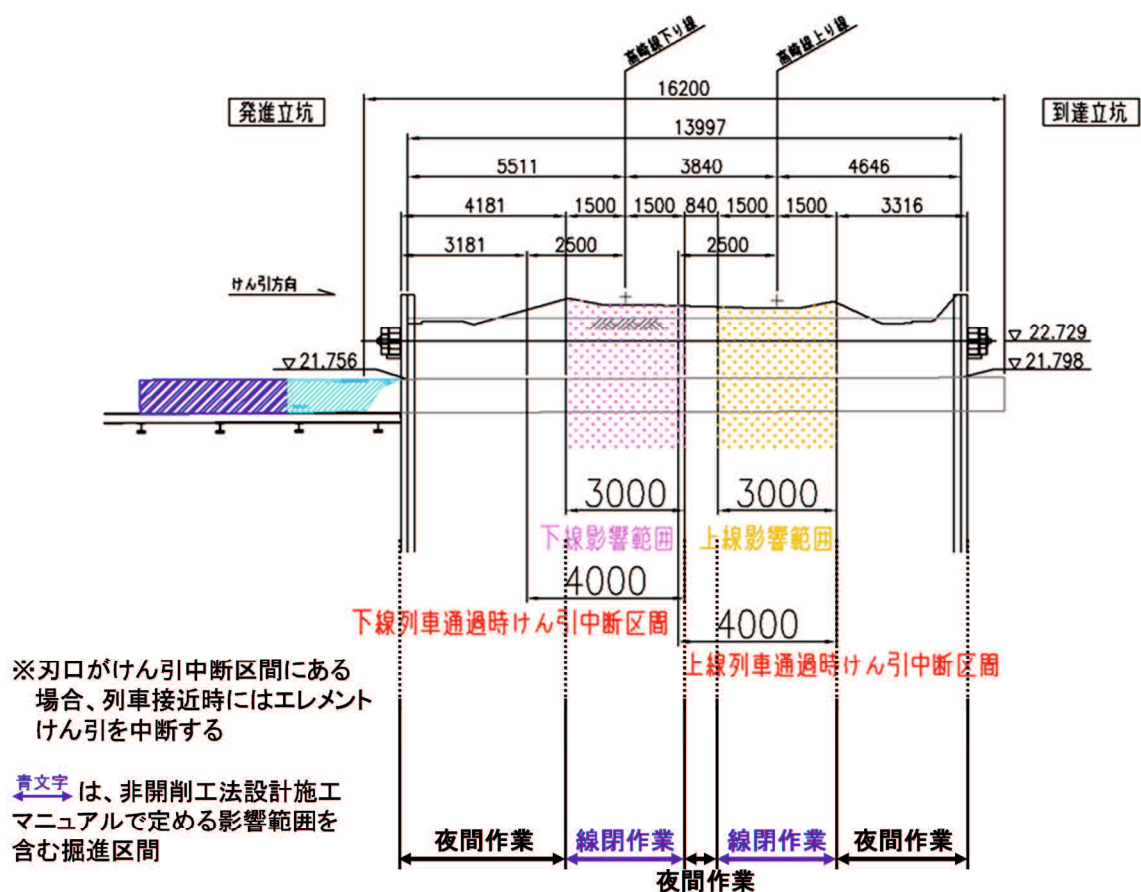


図 4.2.1 上床版エレメントの作業時間帯（ステップ 1）

4.2.2 刃口姿勢管理⁴¹⁾

第3章で述べた刃口の姿勢制御方法を全面的に導入し、エレメント精度管理および地表面への影響低減を図ることとした。刃口姿勢は、実証試験と同様に、刃口内に設置した電子レベル（写真4.2.1）とエレメント後方、発進立坑内に設置したローテーティングレーザー（写真4.2.2）によりリアルタイムに計測を行い、オペレーターが次回掘進のための掘削パターンを掘削作業員に伝達する方法とした。

また、刃口のテーパー形状については、一般部エレメントは、実証試験と同様の形状とし、基準エレメントについては、JES継手がかん合していない状態での掘進となるため、図4.2.4のように、刃口底面のテーパーを底面に一様に設ける形とした。また、実証実験により得られた一般部エレメントの掘削パターンに準じて、表4.2.1のように定めた。



図 4.2.1 電子スタッフ



図 4.2.2 ローテーティングレーザー

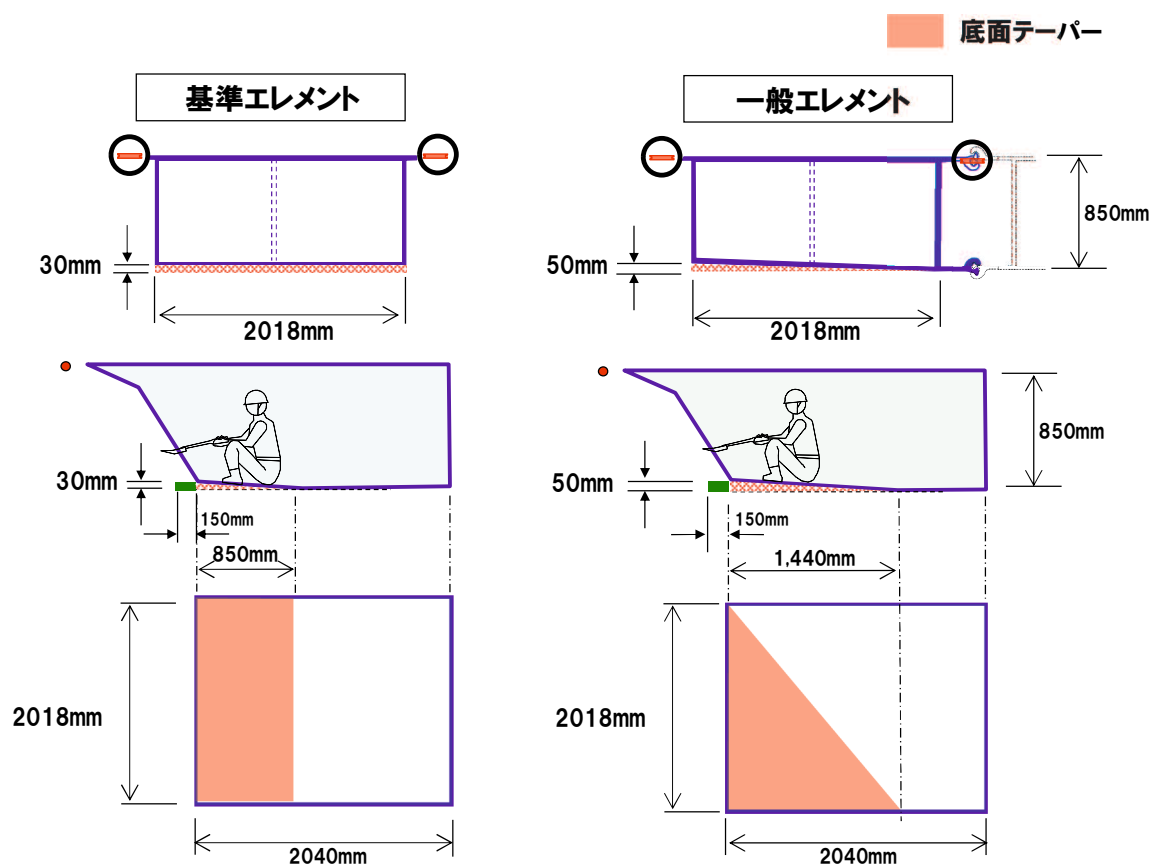

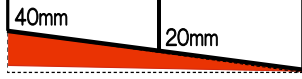


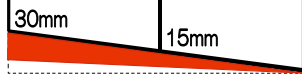


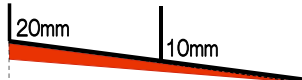


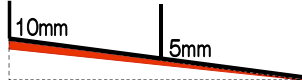


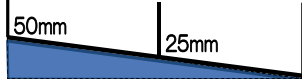


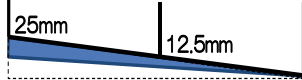






図 4.2.4 刃口のテーパー形状の違い

表 4.2.1 掘削パターン表

エレメント計画高に 対する刃口の計測高さ 『高差』	刃口偏位修正力 の強さと向き	刃口 レベル	掘削パターン（標準エレメント）	掘削パターン（基準エレメント）
$6\text{mm} \geq h > 3\text{mm}$	 6mm	1 高位置②	A : 40mmすき取り 	A : 25mmすき取り 
$3\text{mm} \geq h > 0\text{mm}$	 3mm	2 高位置①	B : 30mmすき取り 	B : 20mmすき取り 
$0\text{mm} \geq h > -2\text{mm}$	 0mm	3 標準高さ	C : 20mmすき取り 	C : 15mmすき取り 
$-2\text{mm} \geq h > -4\text{mm}$	 -2mm	4 低位置①	D : 10mmすき取り 	D : 10mmすき取り 
$-4\text{mm} \geq h > -6\text{mm}$	 -4mm	5 低位置②	E : 50mm突き崩し 	E : 30mm突き崩し 
$-6\text{mm} \geq h > -8\text{mm}$	 -6mm	6 低位置③	F : 25mm突き崩し 	F : 15mm突き崩し 
$-8\text{mm} \geq h > -10\text{mm}$	 -8mm -10mm	7 低位置④	G : 断面通り 	G : 5mmすき取り 

※ -10mm \geq hの場合、ワイヤーによる刃口引き上げを検討すること。

4.2.3 軌道計測管理⁴¹⁾

エレメント掘進中の軌道の計測は、リンク型軌道計測器および水準計を上下それぞれの軌道に設置し、3分間隔で頻度で計測し、リアルタイムでエレメント掘進管理を行なう中央管理室で確認できる体制とした。計測点は上り線、下り線ともに2.5m間隔とした。上床版エレメントは2.4m幅であるため、ほぼ各エレメント直上に計測点を設けている。また、上り線、下り線ともに軌道の剛性向上を目的として簡易軌道桁を設置している。写真4.2.3、4.2.4にリンク型軌道計測器および簡易軌道桁の設置状況を示す。

エレメント施工の影響範囲である二ツ家踏切部では、軌道にリンク型変位計⁴²⁾および水準計が設置できないことから、軌道スコープにより舗装板両端の挙動を光学的に計測した。

軌道変位量の管理値は、JR東日本の定める「近接工事設計施工マニュアル」⁴³⁾に準じ、線区の列車速度に応じた整備基準値をもとに限界値を定め、その値を基準に工事中止値、警戒値を決定し、それぞれの値に達した際の対応を事前に定めることとした。



図 4.2.3 軌道計測状況



図 4.2.4 列車通過状況

表 4.2.2 軌道の管理値

	高低	通り	水準	平面性
警戒値（ $=A \times 0.4$ ）	8mm	8mm	7mm	7mm
工事中止値（ $=A \times 0.7$ ）	15mm	15mm	12mm	12mm
限界値（A）	22mm	22mm	18mm	18mm
運転規制値 及び規制内容	24mm *45km/h以下の徐行	24mm *45km/h以下の徐行	21mm *運転中止	21mm *運転中止
運転規制値 までの余裕	2mm	2mm	3mm	3mm

4. 3 施工実績

4.3.1 施工状況

開発工法の施工は、基準エレメントA1, A2をほぼ同時に施工した後に、図4.3.1に示すように2箇所の基準エレメントより両側に離れていく方向に4班編成で実施した。先に述べたように、軌道影響範囲について基準エレメントは夜間線路閉鎖間合いで、その両側のエレメントは夜間作業で行った後、昼夜の連続施工としたことは、4班とも同様である。

写真4.3.1に刃口の据え付け状況を、写真4.3.2, 4.3.3に4班体制で昼夜連続施工を行なっている状況を示す。また、写真4.3.4には、刃口の到達状況を示す。

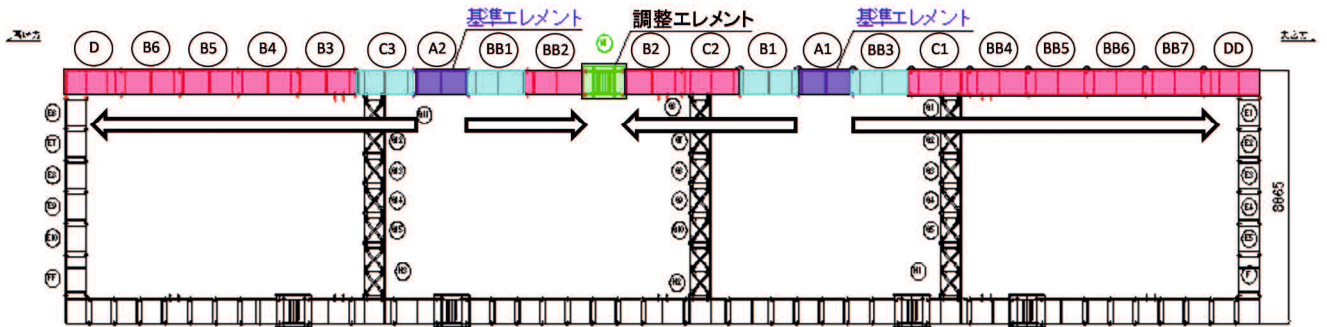


図 4.3.1 上床版エレメント施工順序



写真 4.3.1 基準エレメント発進状況



写真 4.3.2 昼間施工状況（発進側）



写真 4.3.3 昼間施工状況（到達側）



写真 4.3.4 刃口到達状況

当該箇所では、開発工法の施工中、先に述べた埋土の箇所において、いくつかの支障物に遭遇したが、いずれも地盤切削ワイヤーによる切断が可能であり、刃口内部に支障する部分のみを撤去した。写真4.3.5～4.3.9に主な支障物の例を示す。



写真 4.3.5 支障物取り込み状況
(電柱引留め線アンカー基礎)



写真 4.3.6 電柱引留め線アンカー基礎



写真 4.3.7 玉石（切断後）



写真 4.3.8 木製電柱基礎

4.3.2 刃口姿勢制御

掘進に伴う刃口高さの変化を図4.3.2～4.3.5に示す．これは、基準エレメントから継手をかん合せながら順次施工を行なったエレメントをグルーピングしたものであり、大宮方から順にグループ1～4とした．基準エレメントについては、その後継手がかん合する側の刃口高さを、一般部エレメントについてもかん合側ではない、地山に支持されている側の刃口高さを抽出している．

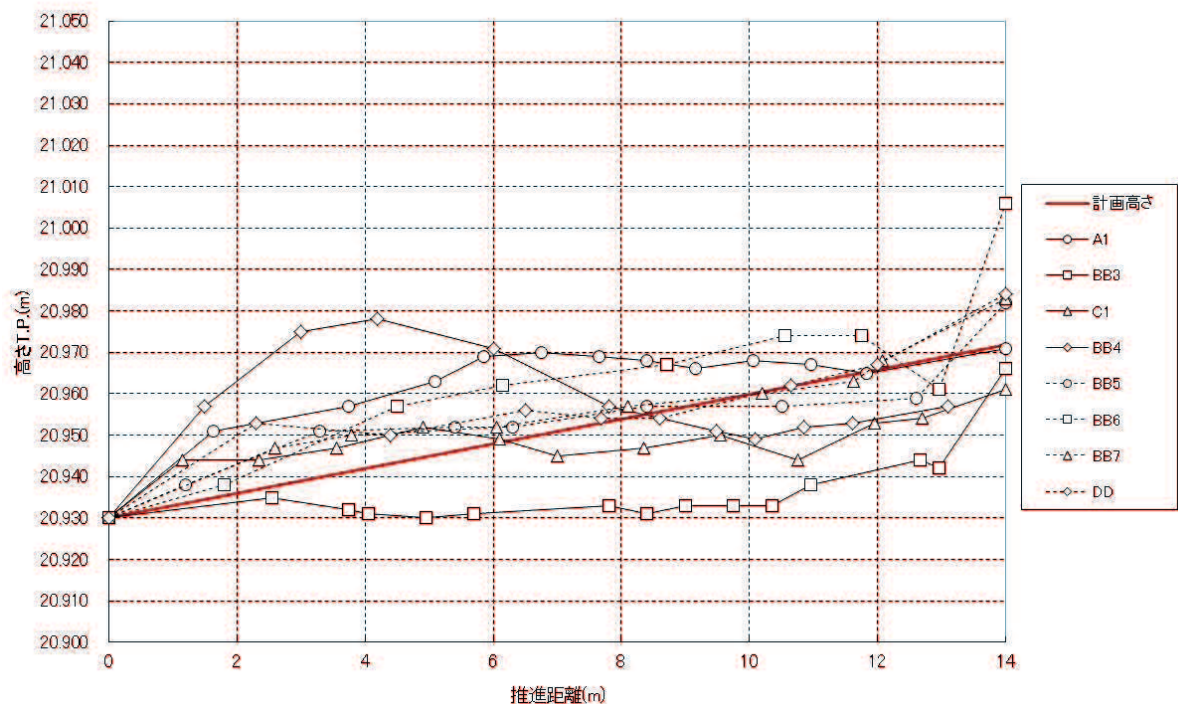


図 4.3.2 掘進距離と刃口高さの関係（グループ1）

(1)グループ 1

基準エレメントA1は、計画高さに対して若干高めで推移している．これに対し、次のBB3エレメントが計画高さに対し低めで掘進し、ローリング傾向が生じている．このことから、その後のC1、BB4エレメントでは計画高さへ戻すための掘進を行っているが、BB4では掘進距離 $L=0\sim 8\text{m}$ まで、逆に計画高さに対して、高い位置となっている．これは、大宮方のローム層が粘性が低く、柔らかい傾向にあったため、適切な地盤反力を得るための掘削パターンを把握するのに、時間がかかったためと考えられる．

その後、BB5エレメントからDDエレメントにかけて、計画高さに対する離隔が小さくなっていることから、この箇所での適切な掘削パターンを選択しながら掘進していることがわかる．なお、到達箇所で大きく刃口高さに変動がでているのは、刃口の沈下対策としてけん引ジャッキを高め設置しているため、刃口が到達するところで上載荷重がなくなり、その影響を受けるためである．

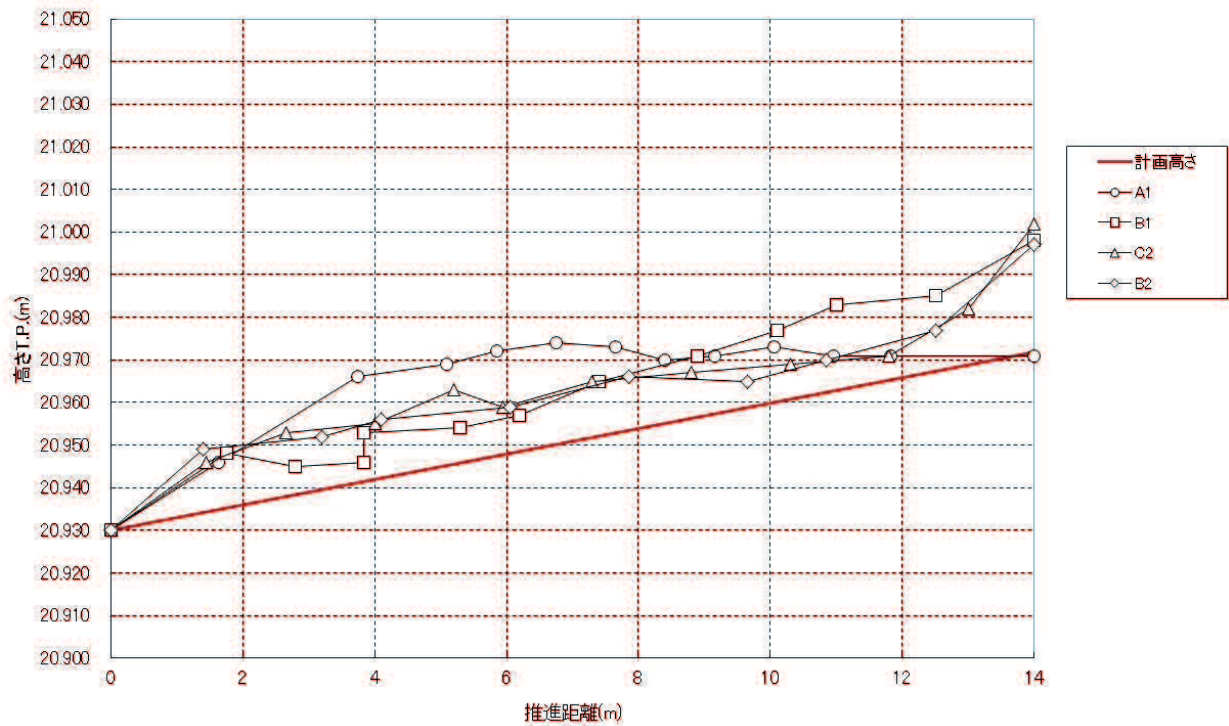


図 4.3.3 掘進距離と刃口高さの関係（グループ 2）

(2)グループ 2

このグループは、基準エレメントA1から高崎方に3本の一般部エレメントを施工している。最初のB1エレメントで基準エレメントA1に対し、若干低めの値で推移しているが、計画高さを下回ることではなく、その後の、C2、B2エレメントについてもほぼ同様の高さとローリング傾向なく施工を完了している。

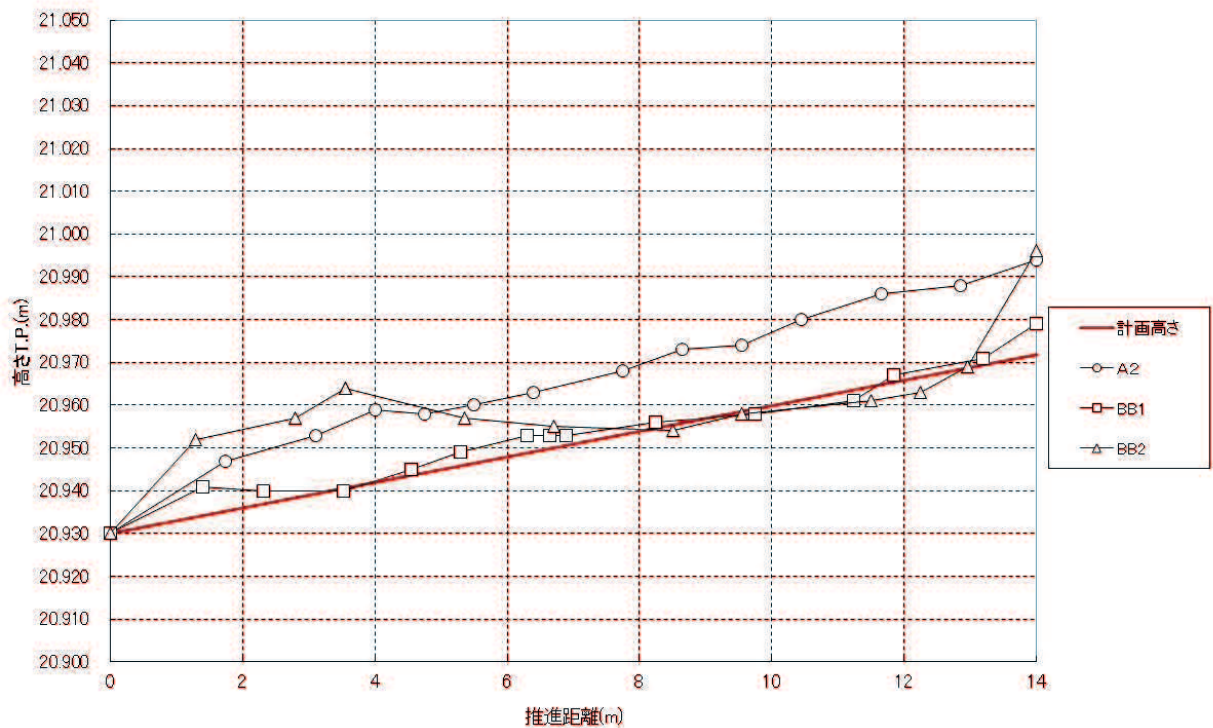


図 4.3.4 掘進距離と刃口高さの関係（グループ 3）

(3)グループ 3

このグループは、基準エレメントA2から大宮方へ2本の一般部エレメントを施工している。A2エレメントが計画高さに対し、高めに推移したため、次のBB1エレメントは掘削パターンを調整しながら、ほぼ計画高さでの掘進となった。しかし、これによりBB1エレメントはローリング傾向が発生したため、その解消のため、BB2エレメントは掘削断面を小さくした掘進が続いたことにより、逆に掘進距離L=0～6m付近では、計画高さより高く推移している。

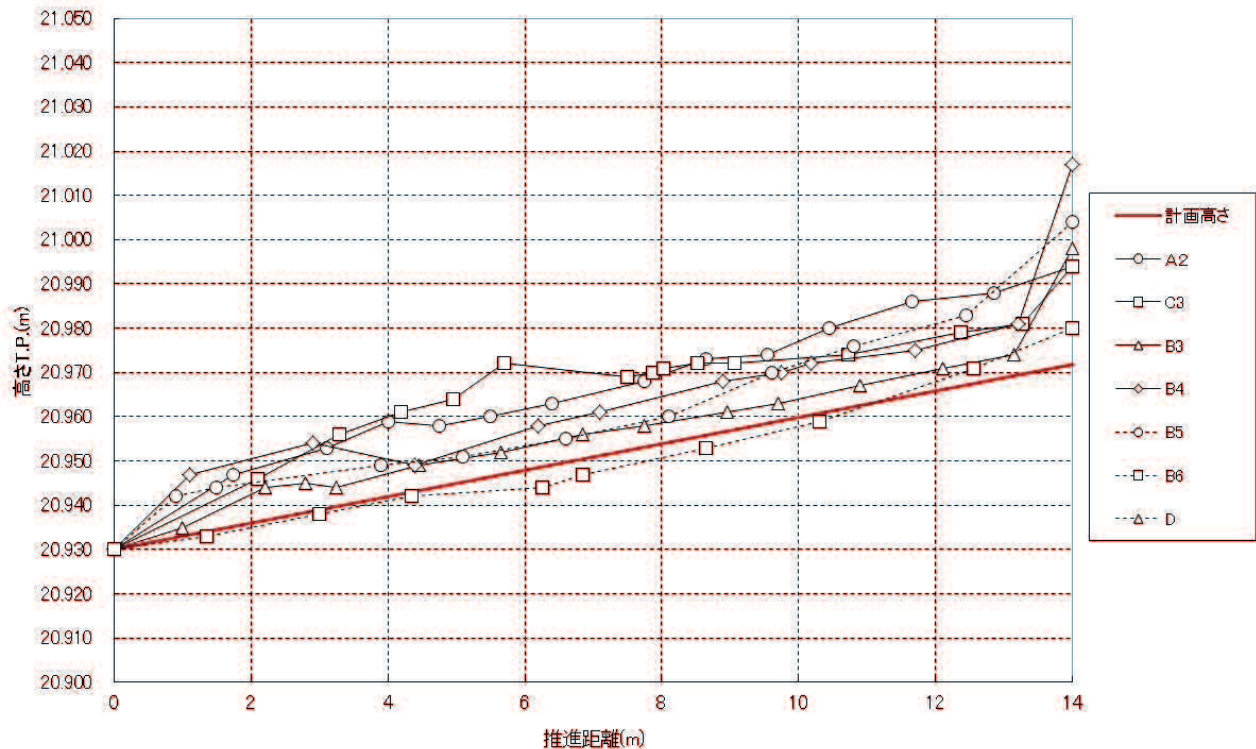


図 4.3.5 掘進距離と刃口高さの関係（グループ 4）

このグループは、基準エレメントA2から高崎方へ一般部エレメント 5 本と隅角部エレメントDを掘進している。若干の高さの変動はあるものの、すべてのエレメントが精度良く掘進できている。これは、高崎方へ向けて、対象地盤であるローム層の粘性が高く、硬い状態であり、掘削パターンの変更に伴い、反応良く刃口姿勢の制御が可能であったことによる。

このように、開発工法を実施した全エレメントについて、刃口姿勢制御により、計画高さに対し、精度良く掘進できることを確認した。しかし、グループ 1 のように、土質によって刃口高さとするべき掘削パターンは異なるため、多くのデータの集約と分析により、土質毎の掘削パターンの選択方法を定めることが求められる。

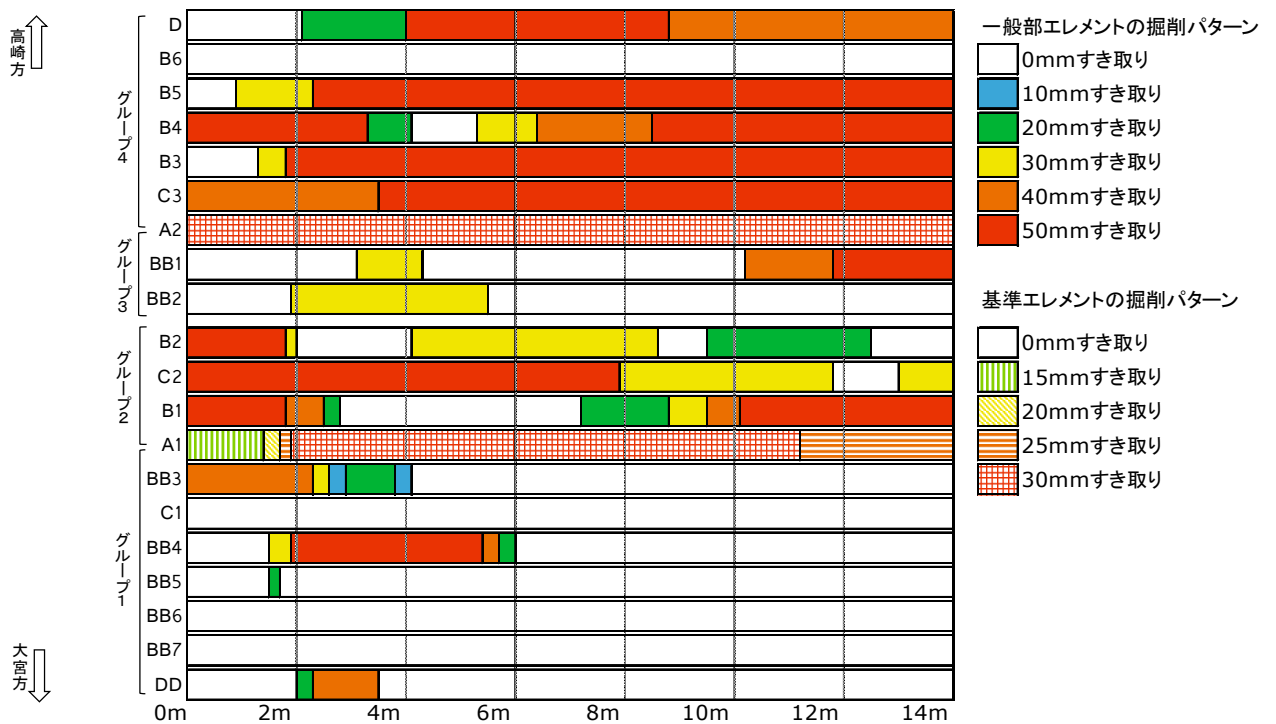


図 4.3.6 各エレメントで選定した掘削パターン ⁴⁴⁾

また、各エレメントで採用した掘削パターンの一覧表を図 4.3.6 に示す。けん引力が比較的大きい値で推移したグループ 1 は、地山の粘性が低く、軟らかい性状であったため、0mm すき取りの範囲が多く、逆に地山の粘性が高く硬いグループ 4 では 30～50mm すき取り（エレメント断面と同形状で掘削）が多く選択されている。実際の施工においては、表 4.2.1 で定めたように $L=150\text{mm}$ の掘進毎に掘削パターンを変更していくような綿密な管理を行なうことは煩雑であったが、リアルタイムで刃口姿勢を確認できることから、適切に掘削パターンを選択していくことが可能であり、刃口姿勢の制御に有効であることを確認した。

なお、開発工法を適用した全 20 エレメントについては、設計上想定している施工余裕範囲内に設置されており、かつ施工精度として求められた掘進距離 L に対する $L/500$ の施工精度を十分満足する設置精度であった。

4.3.3 けん引力

掘進距離とけん引力の関係についても、3.2と同様のグルーピングを行った。図4.3.7～4.3.10にそれぞれのグループにおける掘進距離とけん引力の関係を示す。各図には、後述する開発工法のけん引力算出のための提案式による値を併せて示している。

(1)グループ 1

基準エレメントA1はけん引力は低めに推移している。刃口の姿勢制御のため、ローリング抑制を行ったBB3、C1エレメントが比較的けん引力が高い傾向にある。その後のエレメントは、刃口姿勢が安定するに従って、けん引力も大きな変動がなく、掘進距離に対し、直線的な増加傾向となっており、けん引力を低めで推移している。

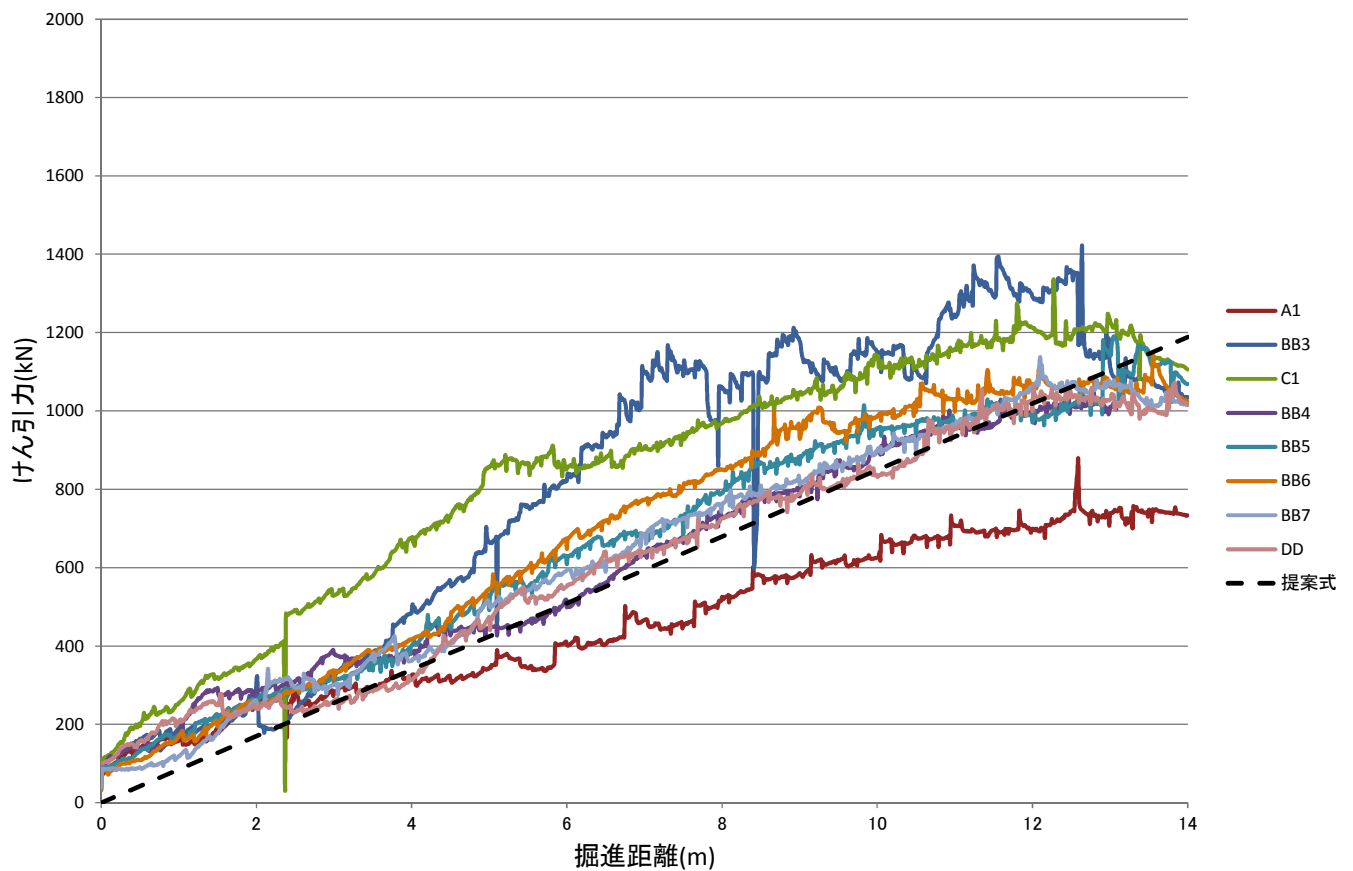


図 4.3.7 掘進距離とけん引力の関係（グループ 1）

(2)グループ 2

B1エレメントは、ローリング抑制のため、掘削断面を小さくしたことにより、中間部分で、若干けん引力が高めで推移している。その他のエレメントについては、掘進距離に対し、ほぼ直線的な増加傾向をみせている。なお、B2エレメントについては、9.65m～10.71m間が距離計の不具合によりデータ収集できていない。

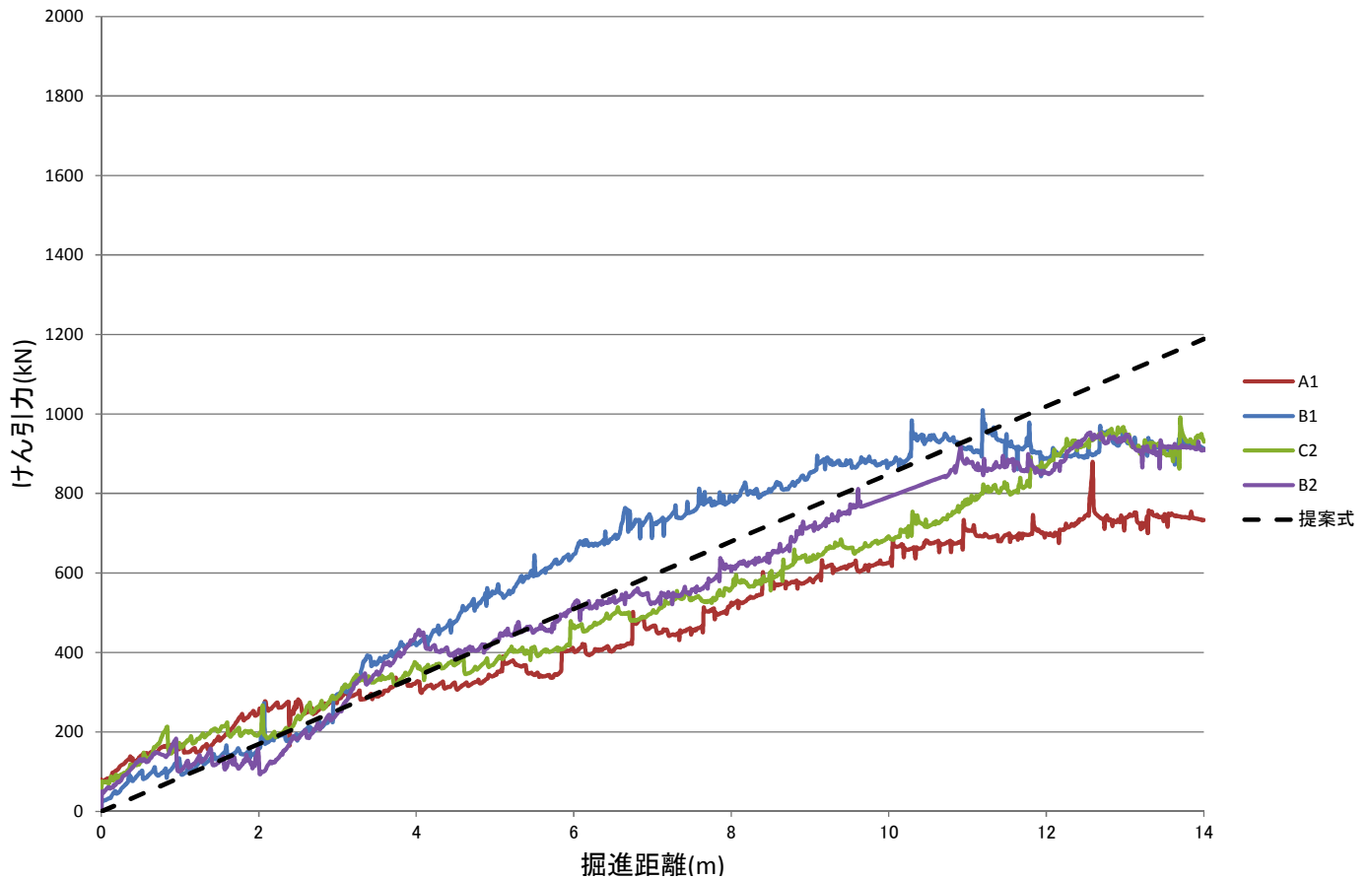


図 4.3.8 掘進距離とけん引力の関係（グループ 2）

(3)グループ 3

基準エレメントであるA2のけん引力は、A1エレメントとほぼ同様であった。後続のBB1、BB2エレメントについてもけん引力の変動は小さく、掘進距離に対し、ほぼ直線的な増加傾向をみせている。

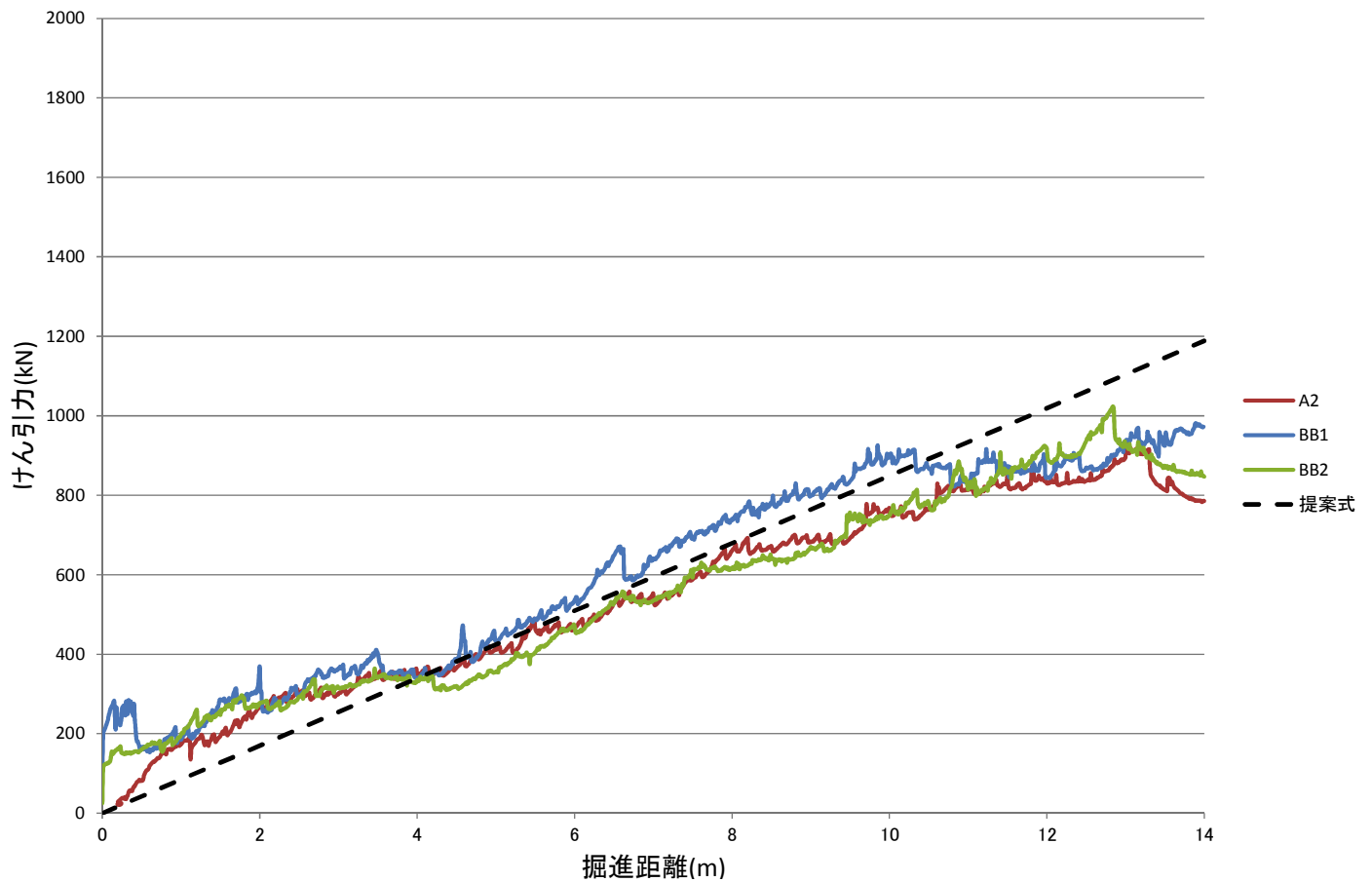


図 4.3.9 掘進距離とけん引力の関係 (グループ 3)

(4)グループ 4

このグループのけん引力は、他のグループに比べ、若干高めで推移している。前半のC3、B3エレメントは比較的けん引力は低めであったが、B4～B6エレメントについては、ローリング抑制の掘削パターンの影響か、けん引力が高めとなっている。B4エレメントにおける $L=0.6\text{m}$ 付近の急激なけん引力の上昇は、日報等には特に記載がなされておらず、原因は不明である。

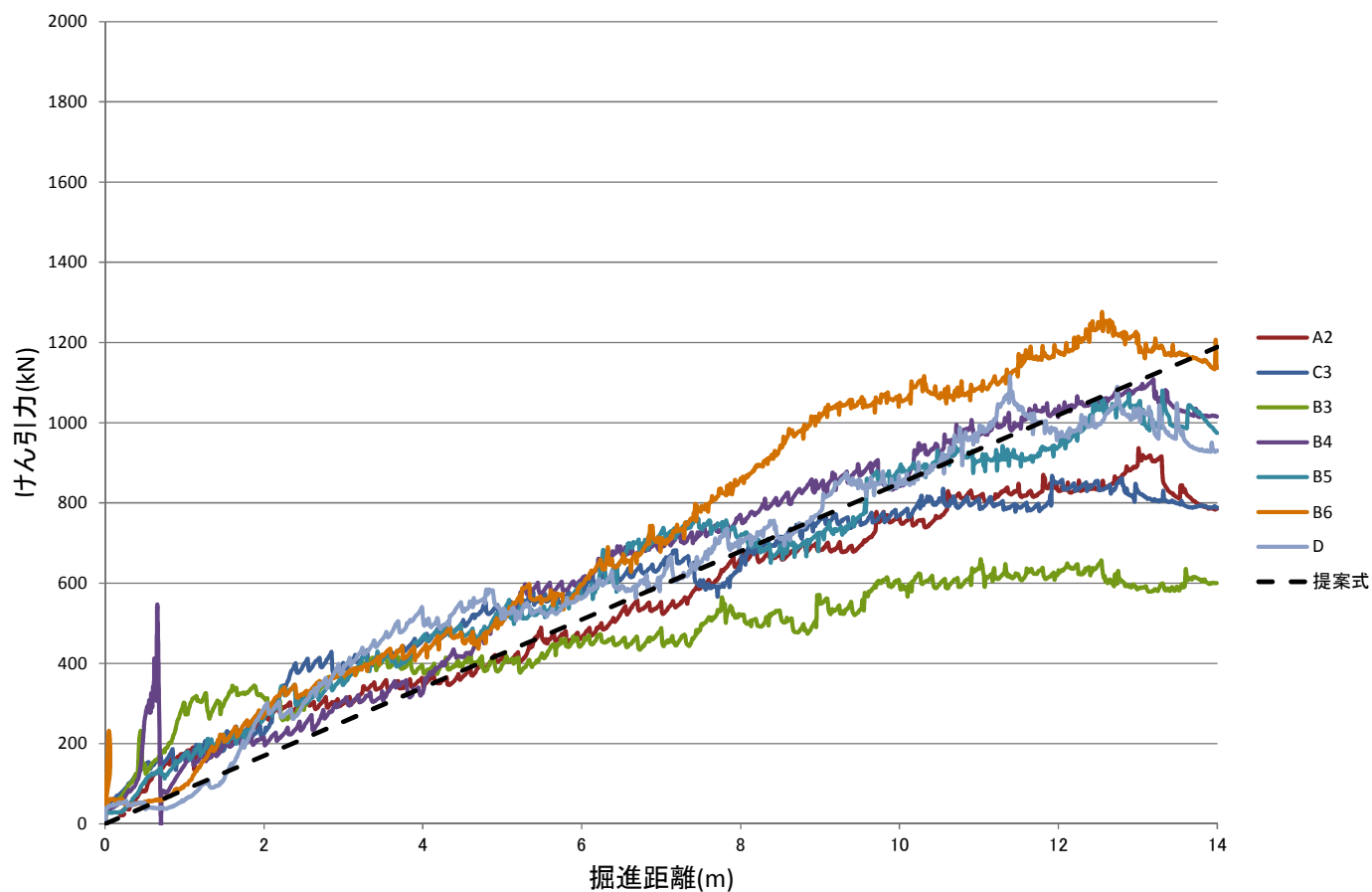


図 4.3.10 掘進距離とけん引力の関係（グループ 4）

これらの結果より，掘削パターンの選択による各エレメント掘進時のけん引力に対する影響について，とりまとめる．まず，第2章で示したように，各エレメントのけん引力と掘進距離の関係を最小自乗法により近似し，式(2.12)，(2.13)より，各エレメントのみかけの周面摩擦係数 μ_e を算出する．その結果について，表4.3.1，図4.3.11に示す．これより，ローリング抑制を必要として，掘削パターンをこまめに選択した等はみかけの摩擦係数が大きくなっているが，連続して同じパターンを選択できたエレメントについては，みかけの摩擦係数 μ_e は，おおよそ0.5程度で推移している．つまり，掘削パターンを変更することで，一時的にテーパ一部の抵抗が大きくなり，先端抵抗が発生する．逆に同じパターンを継続している際には，大きな先端抵抗は発生しないものと想定する．

また，今回の施工実績の範囲であれば，みかけの摩擦係数の平均値 $\mu_e=0.45$ とした場合，

$$\mu_e \cdot P_m = 13.3 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

となり，従来の実績値 $\mu \cdot P_m = 9.8$ を上回る値となった．

これらの結果より，開発工法におけるけん引力の算出式として，式(4.2)～(4.4)を提案する．

$$P = P_1 + P_2 \quad (4.2)$$

$$P_1 = \beta \cdot \mu \cdot P_m \cdot F \cdot L \quad (4.3)$$

$$P_2 = \kappa \cdot L \quad (4.4)$$

ここに， P ：総けん引力(kN)

P_1 ：エレメント全周摩擦による抵抗値(kN)

β ：滑材注入を行なう場合の低減係数

μ ：土とエレメントの摩擦係数 ($\mu=0.45$ とする)

P_m ：周辺の平均土圧 (kN/m²) (エレメント上戴土砂の鉛直土圧とする)

F ：エレメントの単位長さあたりの外周面積(m²/m)

L ：けん引掘進長(m)

P_2 ：継手部のかん合摩擦抵抗値(kN)

κ ：エレメント単位長さあたりの継手部のかん合摩擦抵抗力(kN/m)

$\kappa=20\text{kN/m}$ とする．

である．

表 4.3.1 各エレメントのみかけの摩擦係数の算出

	ΔP (kN)	R^2	κ (kN/m)	F (m ² /m)	P _m (kN/m ²)	F・P _m (kN/m)	μ_e
D	85.2	0.909	20	4.886	29.52	144.2	0.45
B6	99.8	0.961	20	4.886	29.52	144.2	0.55
B5	84.5	0.910	20	4.886	29.52	144.2	0.45
B4	88.3	0.947	20	4.886	29.52	144.2	0.47
B3	57.3	0.177	20	4.886	29.52	144.2	0.26
C3	75.3	0.693	20	4.886	29.52	144.2	0.38
A2	72.6	0.906	0	5.736	29.52	169.3	0.43
BB1	80.7	0.841	20	4.886	29.52	144.2	0.42
BB2	74.2	0.914	20	4.886	29.52	144.2	0.38
B2	70.7	0.923	20	4.886	29.52	144.2	0.35
C2	71.8	0.961	20	4.886	29.52	144.2	0.36
B1	84.3	0.869	20	4.886	29.52	144.2	0.45
A1	61.8	0.895	0	5.736	29.52	169.3	0.37
BB3	110.1	0.819	20	4.886	29.52	144.2	0.62
C1	108.9	0.693	20	4.886	29.52	144.2	0.62
BB4	87.6	0.946	20	4.886	29.52	144.2	0.47
BB5	90.7	0.944	20	4.886	29.52	144.2	0.49
BB6	94.0	0.919	20	4.886	29.52	144.2	0.51
BB7	87.9	0.959	20	4.886	29.52	144.2	0.47
DD	84.8	0.953	20	4.886	29.52	144.2	0.45
平均値							0.45

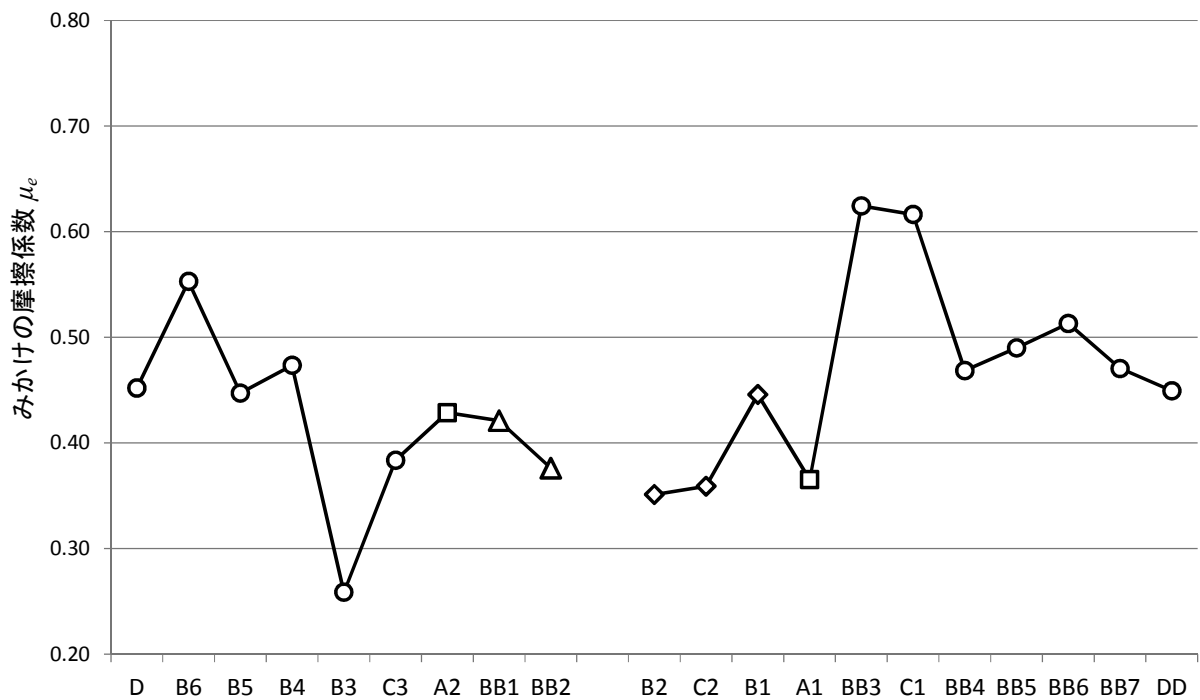


図 4.3.11 各エレメントのみかけの摩擦係数の算定値

4.3.4 軌道変位

エレメント掘進による地表面への影響については、エレメント直上の軌道計測器であるリンク型軌道計測器により評価する。ここで、軌道計測器は第2章4.6(5)に示したように、軌道変位の絶対値を示すものではなく、前後5mの軌道上の点を結んだ直線から計測点の離隔を相対的に求めている。ここで、鉛直方向の離隔を高低、水平方向の離隔を通りとしている。

また、エレメント掘進中についても、通常の保守管理としての軌道整備が行なわれるため、これにより軌道計測値は変化する。図4.3.12にA1エレメントのエレメント掘進中の刃口先端位置とエレメント中心位置での上り線、下り線の軌道の高低の関係を示す。グラフは、刃口先端位置における上り線、下り線の計測器の高低値をプロットしている。

エレメントは下り線側から掘進するため、まず下り線の影響範囲から軌道直下、次に上り線の影響範囲に入り、軌道直下を通過して、到達する。図に示すように軌道整備により生じる計測値の変化はグラフ上に不連続点として表れる。

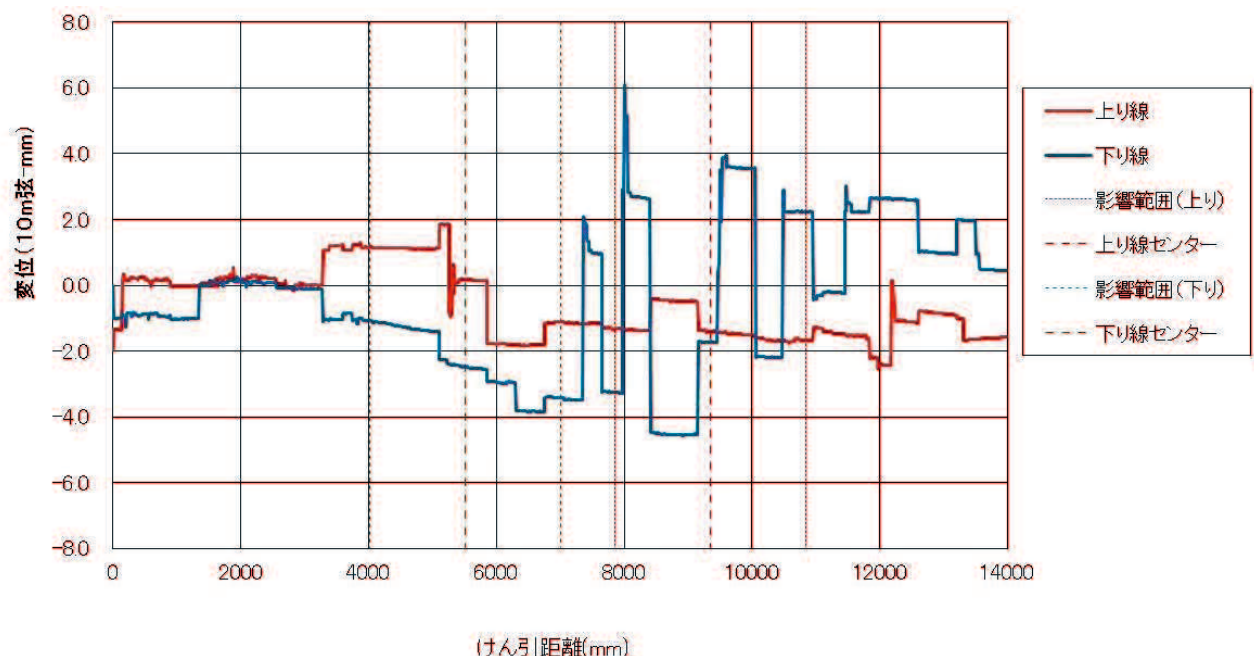


図 4.3.12 掘進距離と軌道変位の関係 (A1 エレメント : 高低)

そこで、掘進中の軌道変位に着目し、この不連続点を補正し、軌道の高低の漸次的な変化のみをプロットすると、図4.3.13となる。掘進後の休止時間等に遅れて軌道変位が生じた場合には、これをネグレクトしてしまうが、掘進に伴う全体的な傾向は、このグラフの方が捕らえられる。

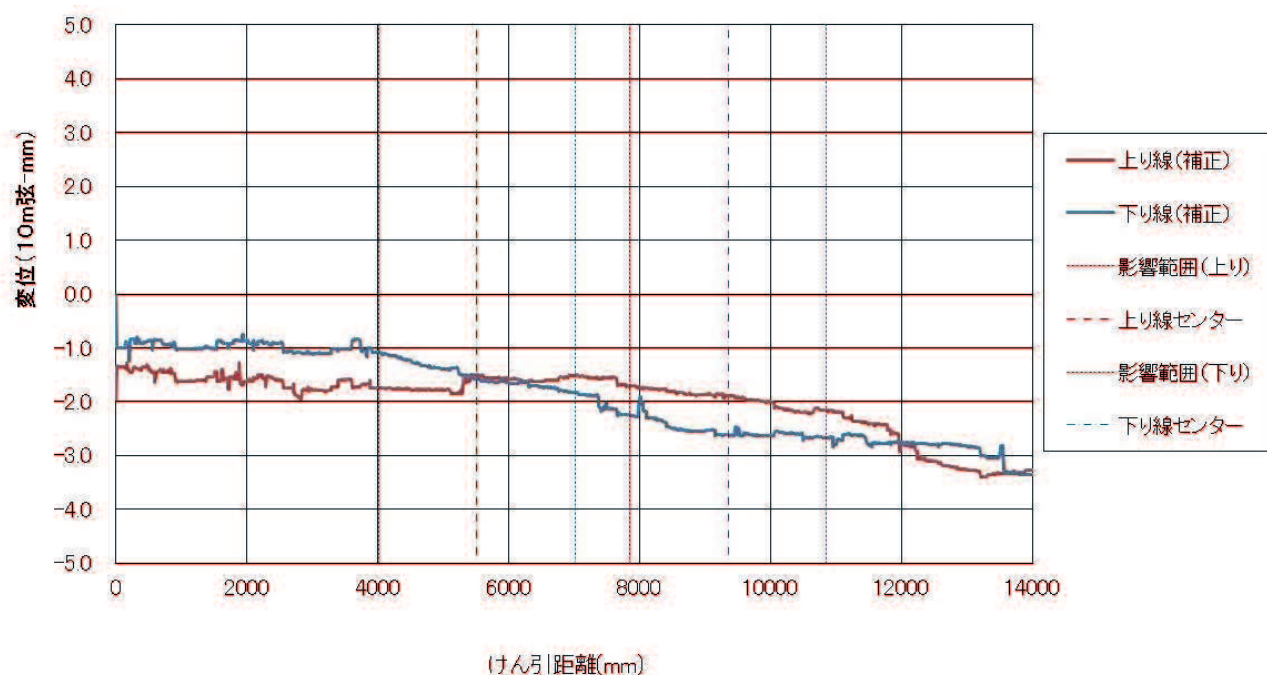


図 4.3.13 掘進距離と軌道変位の関係（A1 エlement：高低）補正後

図4.3.13より、A1Elementについては上り線部、下り線部ともに、明確な先行隆起の傾向は見受けられなかったが、後続沈下については、両軌道の影響範囲に刃口先端が近づいて以降、継続的に発生し、上り線、下り線両方において数mmのオーダーで確認される。

同様に軌道の通りについても補正後の値を示す。

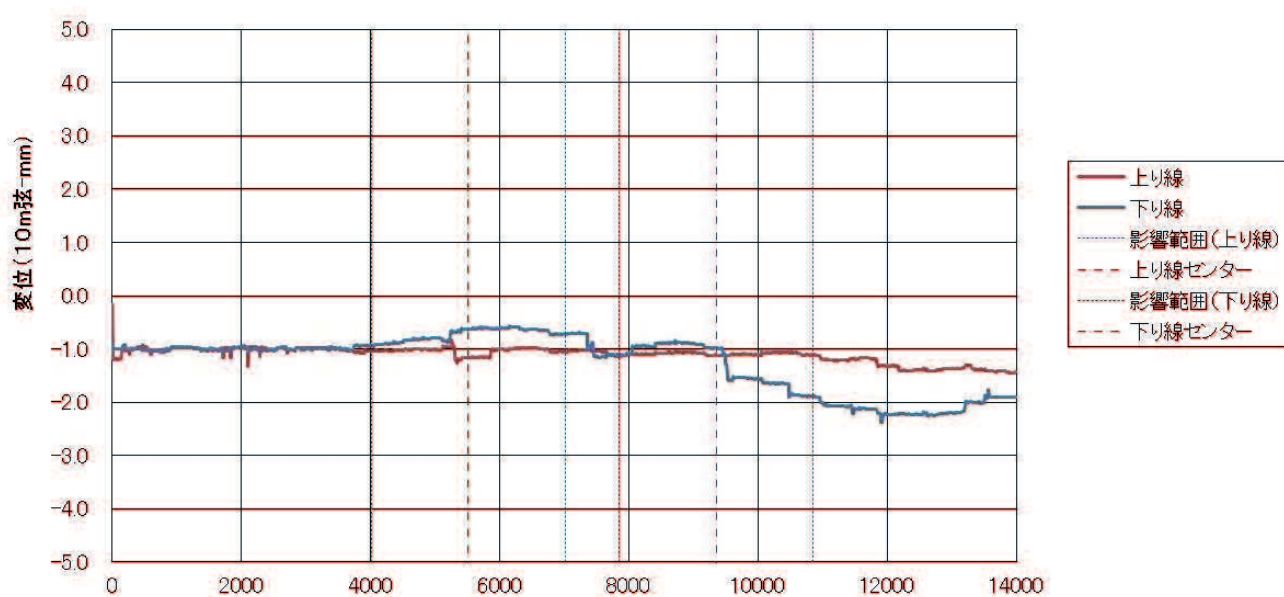


図 4.3.14 掘進距離と軌道変位の関係（A1 Element：通り）補正後

軌道検測において通り変位の符号は、軌間の外方に変位している場合にプラス（+）、内方に変位している場合にマイナス（-）で示す。今回、上り線、下り線ともに、到達側に計測器が設置されているため、下り線については直下を刃口が通過する際に、微少ではあるが、ひきづられて到達側へ変位する傾向を示している。これに対し、上り線側は、ほとんど変位を示していない。

以下に特徴的な軌道変位計測結果を示す。いずれも高低値についてのグラフであり、軌道整備の影響分を差し引いた補正後の値を示している。

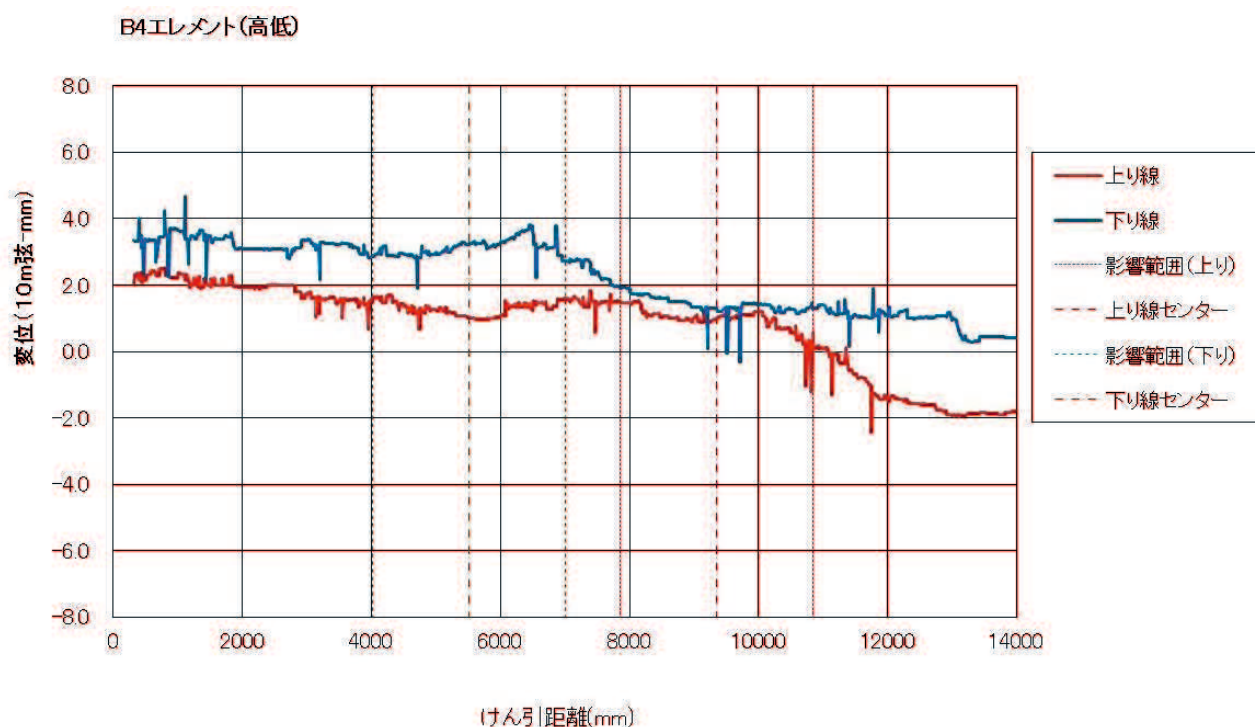


図 4.3.15 掘進距離と軌道変位の関係（B4 エレメント：高低）補正後

図4.3.15は、高崎方のグループ4に属し、刃口下部テーパ部のすき取り量が多かったエレメントである。上り線、下り線ともに、刃口が通過した後の後続沈下の影響が明確にみられる。

次頁の図4.3.16は、グループ2に属するB2エレメントの高低値（補正後）である。上り線に比べて、下り線での後続沈下量が大きくなっている。このエレメントは、図4.3.6に示すように、掘進前半部で、テーパ部のすき取り量を大きくし、中間以降、すき取り量を小さくしている。なお、B2エレメントについては、9.65m～10.71m間が距離計の不具合によりデータ収集できていない。

また、図4.3.17は、グループ1のBB5エレメントであるが、こちらは地盤強度が低く、すき取り量を抑えて掘進した場合の例である。上り線、下り線ともに先行隆起の影響がみられる。

このように、刃口の姿勢制御、すなわちエレメントの精度管理のために掘削パターンを選定しているが、選択した掘削パターンによって、地表面への影響が異なる、すなわち、掘削量を多くすると、後続沈下の原因となり、掘削量を少なくすると、先行隆起に影響する、と言える。

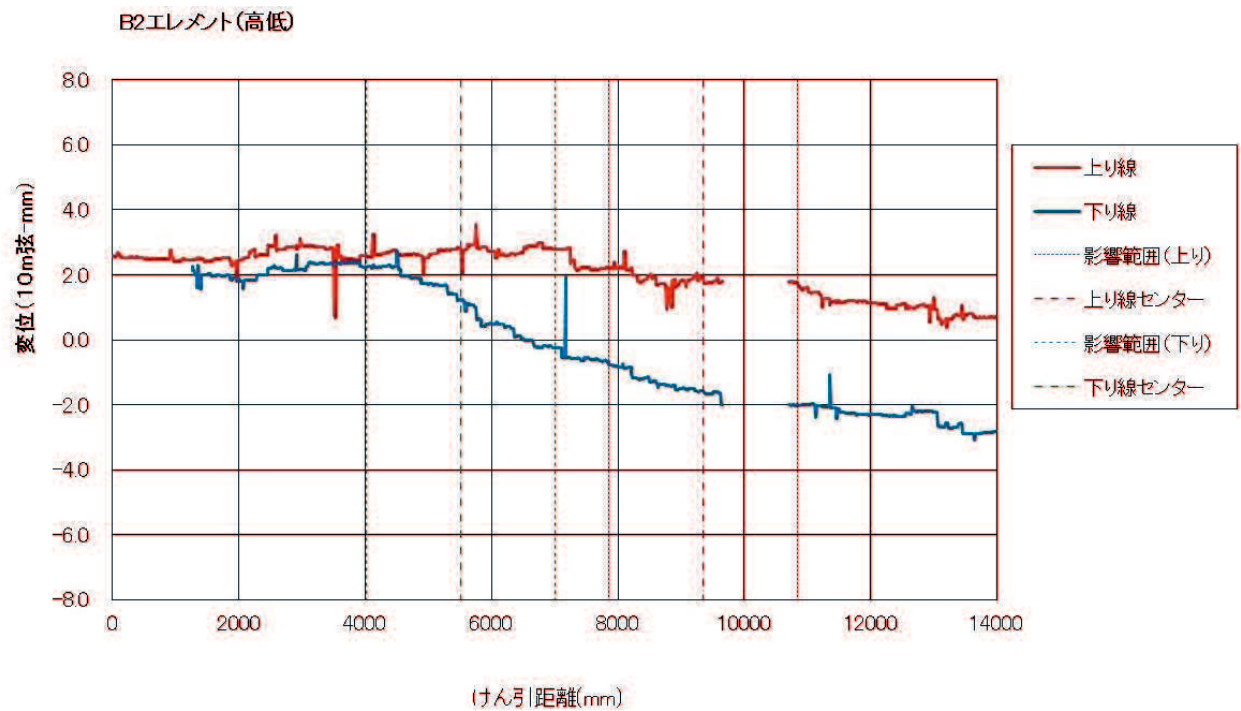


図 4.3.16 掘進距離と軌道変位の関係 (B2 エレメント：高低) 補正後

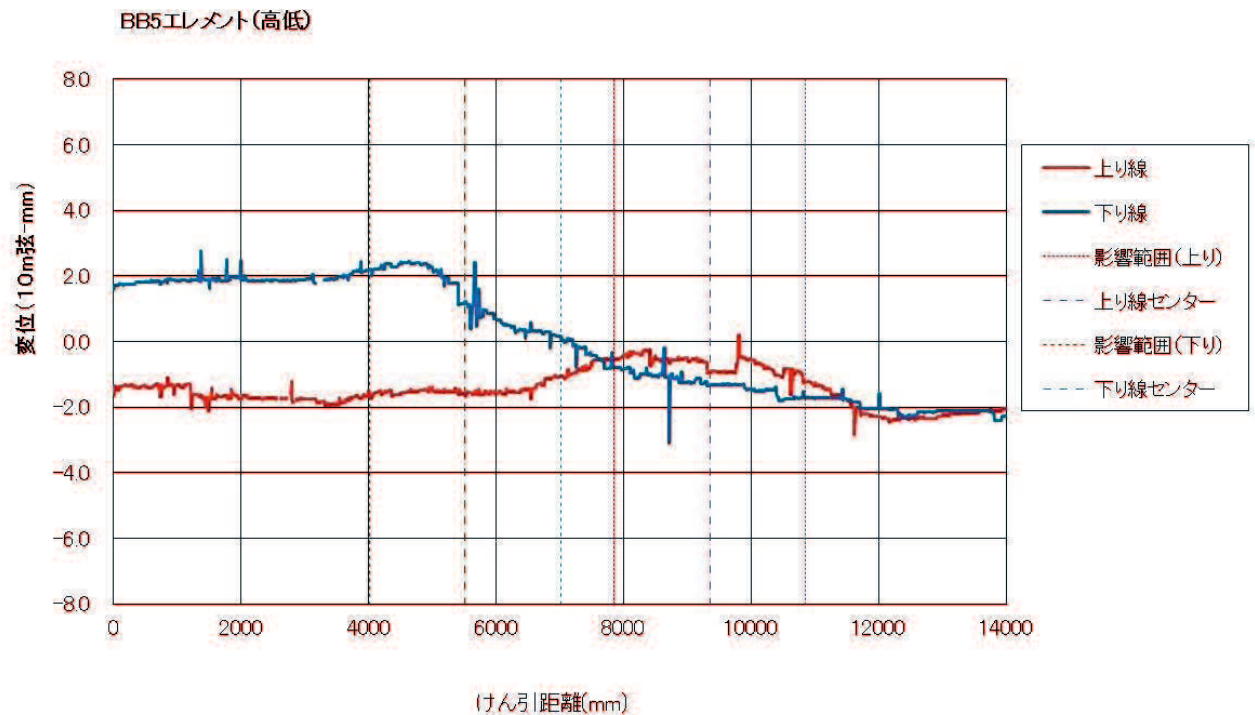


図 4.3.17 掘進距離と軌道変位の関係 (BB5 エレメント：高低) 補正後

このように、エレメント掘進中の軌道変位は、概ね数mmのオーダーであり、なおかつならかな変位傾向を示している。結果として、昼夜、列車運行時間帯を問わず、エレメント掘進を継続したが、列車運行に影響を与えるような変位事象は皆無であった。

4. 4 まとめ

本章では、実施工における20エレメントについて、開発工法を適用し、その実用性、効率性について検証を行った。

まず、適用にあたり、列車運行への安全性を担保するために、綿密な施工計画を立案し、軌道への影響を確認しつつ、導入の可否を判断した。また、第3章での実証試験結果を反映し、刃口姿勢と次にとるべき掘削パターンについて、事前に定め、掘進の中で、適宜、整合性を検証しながら、姿勢制御を行った。

結果として、地盤切削機構については、事前に想定できなかった支障物（玉石、コンクリート製基礎、木製電柱基部等）をエレメント断面に支障する部分だけを切断し、刃口内に取り込むことが可能であった。また、駆動系のトラブルは全20エレメントにおいて皆無であった。プーリーの交換についても1エレメント到達後、偏磨耗が発生しているものについて取替えを行った程度である。地盤切削ワイヤーについては、1エレメント到達毎に、新しいワイヤーに交換することとしたが、20エレメントのうち、半分の10エレメントにおいて途中での破断が認められた。しかし、ワイヤーの交換は定められた手順により行い、交換作業が容易であることを確認した。

刃口姿勢制御は、土質の硬軟によって、掘削パターンの選択方法を定めていく必要があることが判明したが、実施した全エレメントについて、刃口姿勢制御により、計画高さに対し、精度良く掘進できることを確認した。

けん引力については、開発工法では、地盤切削ワイヤーにより刃口の先行ルーフを地山に挿入した状態で掘進することから、先端抵抗は小さく、無視できるレベルであることを確認した。今回の実績より、開発工法のエレメントけん引力は、周面摩擦抵抗と継手のかん合抵抗の和で示されることを確認し、その算出式を提案した。また、けん引力は、掘削パターンをこまめに変更した場合において、一時的に大きめの値を示すこと、同じパターンを継続した場合にはけん引力が小さくなることが認められた。

掘進に伴う地表面への影響を軌道計測結果より検証したが、選択した掘削パターンにより、掘削断面を大きくした場合は後続沈下が大きく、掘削断面を小さくした場合は、先行隆起の傾向が認められた。しかし、これらは土質によって若干異なるものと考えられる。

変位量としては、いずれの変位も微少であり、列車運行時間帯にエレメント掘進を行った今回の事例において、列車運行には全く影響を与えることなく、施工を完了した。

また、開発工法では、地盤切削ワイヤーにより刃口の先行ルーフを地山に挿入した状態で掘進を続けているため、従来工法に比べ、急激なけん引力の変動は少ない。また、実証試験でも同様であったが、刃口先端を地山に貫入させる必要がないため、先端抵抗は小さく、地山を押し上げる危険性もないものとする。

第5章 施工計画手法の確立

5. 1 施工計画における安全性の検討

5.1.1 検討目的

開発工法については、性能試験から、実物大の刃口、エレメントを使用しての実証試験，ならびに本施工への適用を経て、その実用性，効率性を検証してきた．しかし，実証試験から本施工に際しても，土質等の違いが，精度管理や地表面への影響度合いを異なるものになっている．今後，本工法を適用していくにあたり，安全に，精度良く施工を行なうためには，事前に工法の適用範囲を定め，必要な事前対策を実施するとともに，工法の実施にあたっては綿密な計測管理を実施することが求められる．本章では，適用範囲の検討手法と実施対策ならびに，施工管理上求められる計測手法について述べる．

5.1.2 切羽安定性に対する検討⁴⁵⁾

開発工法は，人力掘削による開放型の刃口を特徴としている．そのため，本工法の適用にあたっては，切羽の自立性の確保が第一条件となる．本工法は，地盤を切削し，形成した溝に先行ルーフを差し込んだ状態で地山を掘削するため，従来の刃口推進工法等に比べ，安全性は高いと考えられるが，その安全性について，定量的に検証しておくことが必要である．

(1)検討モデル

そこで，切羽の安全性の検討について，図 5.1.1 に示すように，切羽前面地盤の崩壊形状を横型円筒状と仮定した三次元円筒すべりの方法⁴⁶⁾を用い，すべり土塊に作用する列車荷重等の上載荷重および自重によるすべりモーメントと土塊のせん断抵抗力とのつり合いから安全率を求めることとした．なお，刃口の幅はすべり土塊に対して，限定的であるため，抵抗力としてはすべり土塊の側面抵抗力も考慮している．

刃口形状としては，第3章，第4章で用いた開発工法の刃口形状とした．先行ルーフによる前面地盤のすべり抵抗を考慮した場合のモデル図のイメージを図 5.1.2 に示す．

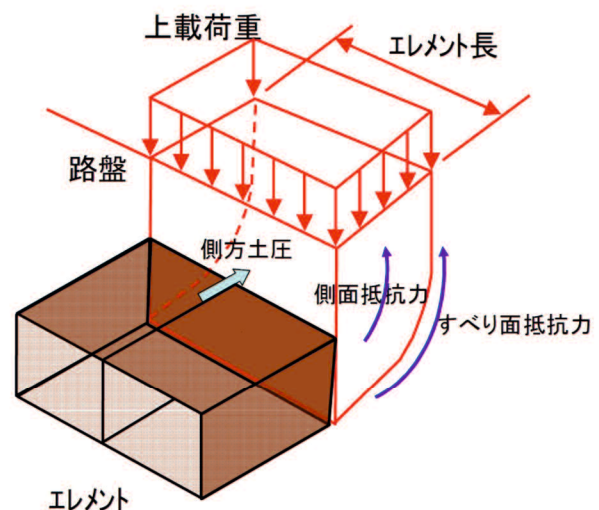


図 5.1.1 横型円筒検討モデル

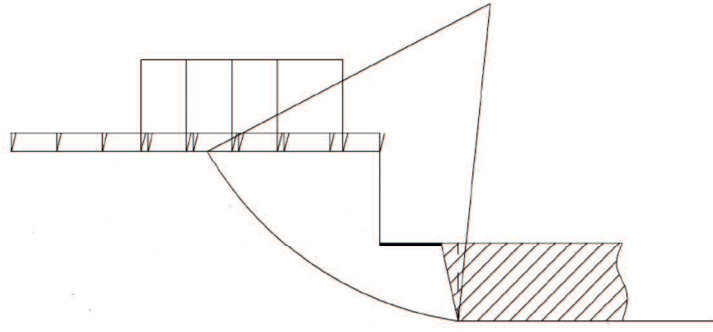


図 5.1.2 先行ルーフを考慮した安定検討モデルのイメージ

切羽の安定に対する安全率の算出式を以下に示す.

$$F_S = \frac{M_{br} + M_{sr}}{M_{ss}} \quad (5.1a)$$

$$M_{br} = R \sum (cL + W \cos \alpha \cdot \tan \phi) \quad (5.1b)$$

$$M_{sr} = 2 \cdot \tau_c \cdot A_s \cdot L_c \quad (5.1c)$$

$$M_{ss} = R \sum (W \cdot \sin \alpha) \quad (5.1d)$$

ここに, F_S : 安全率

M_{br} : すべり面での抵抗モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

M_{sr} : すべり土塊側面の抵抗モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

M_{ss} : すべり土塊の起動モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

R : すべり円弧の半径 (m)

c : すべり面の粘着力 (kN/m^2)

L : 分割法による1スライスのすべり面長 (m)

W : 分割法による1スライスの重量 (kN)

α : 各スライスのすべり面が水平となす角度 ($^\circ$)

ϕ : すべり面のせん断抵抗角 ($^\circ$)

τ_c : すべり土塊側面抵抗面図心のせん断抵抗 (kN/m^2) $= (q + \sigma_c) \tan \phi + c$

q : すべり土塊に作用する上載荷重 (kN/m^2)

σ_c : すべり土塊側面図心までの土の平均単位体積重量 (kN/m^3)

A_s : すべり土塊側面の面積 (m^2)

L_c : すべり円弧中心から図心までの距離 (m)

である.

(2)作用荷重

切羽の安定検討において, すべり土塊の自重の他に, 以下の荷重を考慮した.

a)上載荷重

軌道下を通過する際を考慮し、軌きょう荷重として、以下の値を考慮した⁴⁷⁾。

$$q_1 = 10 \text{ kN/m}^2 \quad (5.2)$$

b)列車荷重

列車荷重による鉛直土圧の算定については、まくらぎから道床を介し路盤に伝達される道床圧力分布より算出する⁴⁸⁾。

$$q_2 = \frac{P}{B \cdot L_a} \quad (5.3)$$

ここに、 q_2 ：列車荷重による鉛直土圧 (kN/m²)

P ：軸重 (kN)

B ：列車荷重分布幅 (m)

L_a ：軸距(m)

また、すべり土塊に作用する列車荷重による衝撃の影響については、下式により衝撃係数を用いて、算定する⁴⁹⁾。

$$i = i_0 \left(\frac{2.5 - H'}{1.5} \right) \quad (5.4)$$

ただし、 $H' \leq 1.0\text{m}$ では、 $i = i_0$

$H' \geq 2.5\text{m}$ では、 $i = 0$

ここに、 i ：すべり土塊に作用する衝撃係数

i_0 ：スパンにより定まる基本衝撃係数

H' ：土かぶり厚(m) (道床厚を含む)

ここで、スパンにより定まる基本衝撃係数 i_0 は、下式により算定する⁵⁴⁾。

$$i_0 = K_a \cdot \alpha + \frac{10}{65 + L} \leq 0.6 \quad (5.5)$$

ここに、 i_0 ：スパンにより定まる基本衝撃係数

K_a ：列車荷重の種別等に対して表5.1.1に定める係数

α ：速度パラメーター

$$\alpha = \frac{V}{7.2n \cdot L} \quad (5.6)$$

V ：列車または車両の最高速度 (km/h)

n ：部材の基本固有振動数 (Hz)

L ：部材のスパン (m)

表 5.1.1 係数 K_a ⁵⁰⁾

列車荷重の種別	最高速度または 最高速度パラメーター	その他の適用条件	K_a
機関車荷重	$V \leq 130\text{km/h}$	$L \geq 10\text{m}$ $L < 10\text{m}$ かつ $\alpha \leq 0.1$ $L < 10\text{m}$ かつ $\alpha > 0.1$	1.0 1.0 1.5
電車・内燃動車荷重	$V \leq 160\text{km/h}$	—	1.0
新幹線荷重	$\alpha \leq 0.33$ $\alpha > 0.33$	— —	1.0 別途検討

これより、衝撃を含めた列車荷重による鉛直土圧は、下式のとおりとする。

$$q_{Li} = q_2 \cdot (1+i) \quad (5.7)$$

ここに、 q_{Li} ：列車荷重による鉛直土圧（衝撃を含む）（ kN/m^2 ）

c)側方土圧

抵抗側の荷重として、エレメント上部土塊の受働側圧を考慮する。受働土圧は、下式により算定するものとする ⁵¹⁾。

$$\text{砂質土の場合 } p_p = K_{pr} \left(\sum \gamma_{ti} \cdot h_i - p_w \right) + K_{pc} \cdot c + p_w \quad (5.8)$$

$$\text{粘性土の場合 } p_p = K_{pr} \left(\sum \gamma_{ti} \cdot h_i \right) + K_{pc} \cdot c \quad (5.9)$$

$$\text{ただし, } \sum \gamma_{ti} \cdot h_i - p_w \geq 0$$

ここに、 p_p ：受働側圧(kN/m^2)

K_{pr} ：着目点における地盤の自重成分に対する受働土圧（側圧）係数

K_{pc} ：着目点における地盤の粘着力成分に対する受働土圧（側圧）係数

c ：着目点における土の粘着力度(kN/m^2)

$\sum \gamma_{ti} \cdot h_i$ ：着目点における地盤の全上載圧(kN/m^2)

p_w ：着目点における地盤の間隙水圧(kN/m^2)

(3)検討結果

第4章で用いた幅 $W=2,400\text{mm}$ の刃口と、後に述べる標準化した場合の $W=2,240\text{mm}$ の刃口の場合について、鉄道盛土の各種土質⁵²⁾における安全性の検討を行った。なお、必要安全率は既往の研究⁴⁶⁾を参考に、 $F_s=1.2$ とした。検討結果を以下に示す。

表 5.1.2 安定計算結果一覧表

エレメント幅 2.400 m

土質定数			土被り h (m)	$M_{br}(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{sr}(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{ss}(\text{kN}\cdot\text{m})$	F_s	必要安全率	判定
$\gamma (\text{kN/m}^3)$	$\varphi (^\circ)$	$c (\text{kN/m}^2)$							
18	45	6	0.80	251.0	134.1	326.2	1.18	1.2	NG
			1.00	338.2	194.3	416.2	1.28		OK
			2.00	219.6	263.9	251.0	1.94		OK
17	40	6	0.80	240.2	113.7	321.8	1.10	1.2	NG
			1.00	302.4	164.2	410.2	1.14		NG
			2.00	193.0	225.1	245.0	1.71		OK
16	35	6	0.80	203.8	96.7	317.8	0.95	1.2	NG
			1.00	272.9	139.0	404.4	1.02		NG
			2.00	171.4	191.3	239.0	1.51		OK
14	0	18	0.80	558.2	115.4	545.8	1.23	1.2	OK
			1.00	687.6	153.0	659.5	1.27		OK
			2.00	369.1	179.4	377.5	1.45		OK
16	30	0	0.80	20.4	25.0	88.8	0.51	1.2	NG
			1.00	37.4	42.8	143.5	0.56		NG
			2.00	83.5	118.9	239.0	0.85		NG

エレメント幅 2.240 m

砂質土			土被り h (m)	$M_{br}(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{sr}(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{ss}(\text{kN}\cdot\text{m})$	F_s	必要安全率	判定
$\gamma (\text{kN/m}^3)$	$\varphi (^\circ)$	$c (\text{kN/m}^2)$							
18	45	6	0.80	234.3	134.1	304.5	1.21	1.2	OK
			1.00	315.7	194.3	388.5	1.31		OK
			2.00	205.0	263.9	234.3	2.00		OK
17	40	6	0.80	224.2	113.7	300.3	1.12	1.2	NG
			1.00	282.2	164.2	382.9	1.17		NG
			2.00	180.1	225.1	228.7	1.77		OK
16	35	6	0.80	190.2	96.7	296.6	0.97	1.2	NG
			1.00	254.7	139.0	377.4	1.04		NG
			2.00	160.0	191.3	223.1	1.57		OK
14	0	18	0.80	521.0	115.4	509.4	1.25	1.2	OK
			1.00	641.8	153.0	615.5	1.29		OK
			2.00	344.5	179.4	352.3	1.49		OK
16	30	0	0.80	19.0	25.0	82.9	0.53	1.2	NG
			1.00	34.9	42.8	133.9	0.58		NG
			2.00	77.9	118.9	223.1	0.88		NG

検討の結果，一般的な鉄道盛土で想定される土質条件であれば，開発工法適用時の切羽の安定性に問題ないことを確認した．一方，自立性の低い土質条件では，十分な安定性が確保できない場合が想定されるため，エレメント掘進方法や補助工法等の検討を別途行うことが望ましい．

5.1.3 上載土砂滑動に対する検討⁴⁵⁾

開発工法を小さな土被りの条件で適用しようとする場合，エレメントの掘進に伴い，エレメント上部の土塊にエレメント上面との摩擦力により，同時に掘進方向に移動しようとする滑動力が作用する．これに抗する力は掘進するエレメントの両側の地盤のせん断抵抗力であり，滑動力が大きい場合，地表面には掘進方向への水平変位が発生する．

よって，開発工法の適用にあたっては，上載土砂滑動に対する検討を行うものとする．

(1) 検討モデル

検討モデルは，一様な地盤の下をエレメントが通過する状態を想定し，上部土塊がエレメント幅で前方移動しようとする際に作用する水平力（滑動力）に対し，両側の地盤との間に生じるせん断面の抵抗力と比較するものとした．せん断面は，安全側を考慮して鉛直面としている．

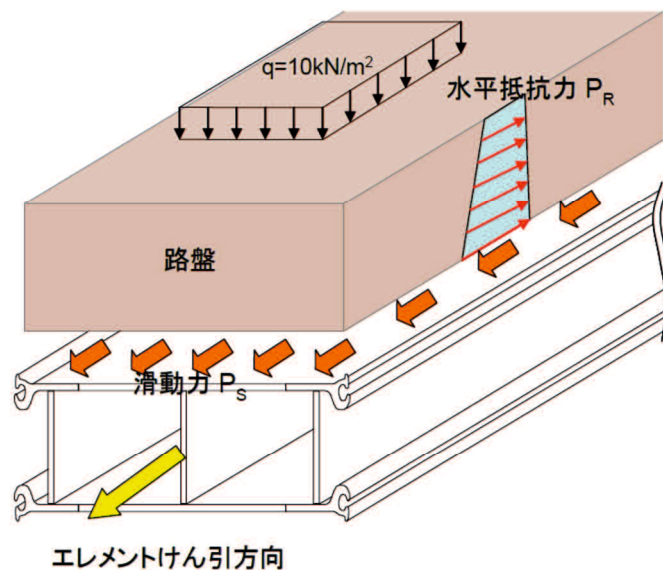


図 5.1.3 上載土砂の滑動に対する検討モデル

(2) 滑動力

エレメントけん引力により生じる上載土砂の滑動力は，第2章で示すけん引力の算定に用いるエレメント全周摩擦による抵抗値⁵³⁾を参考に算出する．

$$P_s = P \cdot L \cdot B \quad (5.10)$$

ここに， P_s ：エレメント延長 1m 当りの滑動力 (kN)

P ：周面摩擦抵抗値 (kN/m²) (= $\mu \cdot P_m = 9.8$)

μ : 土とエレメントの摩擦係数
 P_m : 周辺の平均土圧 (kN/m²)
 L : エレメント延長
 B : エレメント幅 (m)

(3)土塊の水平抵抗力

せん断面における水平抵抗力は、土塊のせん断抵抗角および粘着力から算出する.

$$P_R = 2 \cdot \sum \tau \cdot L = 2 \cdot h_B \cdot (K_0 \cdot \sigma_{vs} \cdot \tan \phi_s + c_s) \cdot L \quad (5.11)$$

ここに、 P_R : 上載土砂の水平抵抗力 (kN)

τ : せん断抵抗 (kN/m²) = $\sigma_{vs} \cdot \tan \phi_s + c_s$

L : エレメント長 (1m)

h_B : エレメント上面までの土かぶり

K_0 : 静止土圧係数

σ_{vs} : 上載土砂図心位置における土の上載圧 (kN/m²)

ϕ_s : 上載土砂のせん断抵抗角 (°)

c_s : 上載土砂の粘着力(kN/m²)

(4)検討結果

第4章で用いた幅 W=2,400mm の刃口と, 後に述べる標準化した場合の W=2,240mm の刃口の場合について, 安全性の検討を行った. なお, 各種土質については, 鉄道盛土⁵²⁾において規定される土質定数を参考に選定した. 必要安全率は既往の研究⁴⁶⁾を参考に, Fs=1.2 とした. 検討結果を以下に示す.

表 5.1.3 上載土砂滑動検討結果一覧表

土質定数			土被り h_B (m)	水平抵抗力 P_R (kN/m)	エレメント幅 W=2,400mm			エレメント幅 W=2,240mm				
γ (kN/m ³)	ϕ_s (°)	c_s (kN/m ²)			滑動力 P_s (kN/m)	安全率 F_s		判定	滑動力 P_s (kN/m)	安全率 F_s		判定
18	45	6	0.50	13.3	23.5	0.6	1.2	NG	22.0	0.6	1.2	NG
			0.80	23.4		1.0		NG		1.1		NG
			1.00	31.0		1.3		OK		1.4		OK
			1.50	53.3		2.3		OK		2.4		OK
17	40	6	0.50	12.0	23.5	0.5	1.2	NG	22.0	0.5	1.2	NG
			0.80	20.9		0.9		NG		1.0		NG
			1.00	27.5		1.2		OK		1.3		OK
			1.50	46.6		2.0		OK		2.1		OK
16	35	6	0.50	10.9	23.5	0.5	1.2	NG	22.0	0.5	1.2	NG
			0.80	18.8		0.8		NG		0.9		NG
			1.00	24.6		1.0		NG		1.1		OK
			1.50	41.1		1.7		OK		1.9		OK
14	0	18	0.50	18.0	23.5	0.8	1.2	NG	22.0	0.8	1.2	NG
			0.80	28.8		1.2		OK		1.3		OK
			1.00	36.0		1.5		OK		1.6		OK
			1.50	54.0		2.3		OK		2.5		OK
16	30	0	0.50	4.0	23.5	0.2	1.2	NG	22.0	0.2	1.2	NG
			0.80	7.6		0.3		NG		0.3		NG
			1.00	10.4		0.4		NG		0.5		NG
			1.50	19.1		0.8		NG		0.9		NG

検討の結果，土かぶりの小さい箇所では，土質によって不安定となる箇所が発生しているが，実用的な範囲においては，おおむね安全性を確保できた．安全性の確保できない場合は，滑材や摩擦低減シート等の使用を検討する必要がある．

5. 2 ガイドパイプ敷設工

開発工法でエレメント掘進に先立ち行われるガイドパイプ敷設工については、その精度がエレメント掘進の可否に影響するため、重要となる。

5.2.1 工法分類

ガイドパイプとして使用する硬質ポリ塩化ビニル管は、JISK6741 に規定される VP 管（呼び径 300mm）を用いることから、この敷設については、一般的な土質の場合、推進工法のうち低耐荷力方式を採用することが良い。推進工法のうち、 $\phi 800\text{mm}$ 未満の小口径推進工法は図 5.2.1 のように分類される。

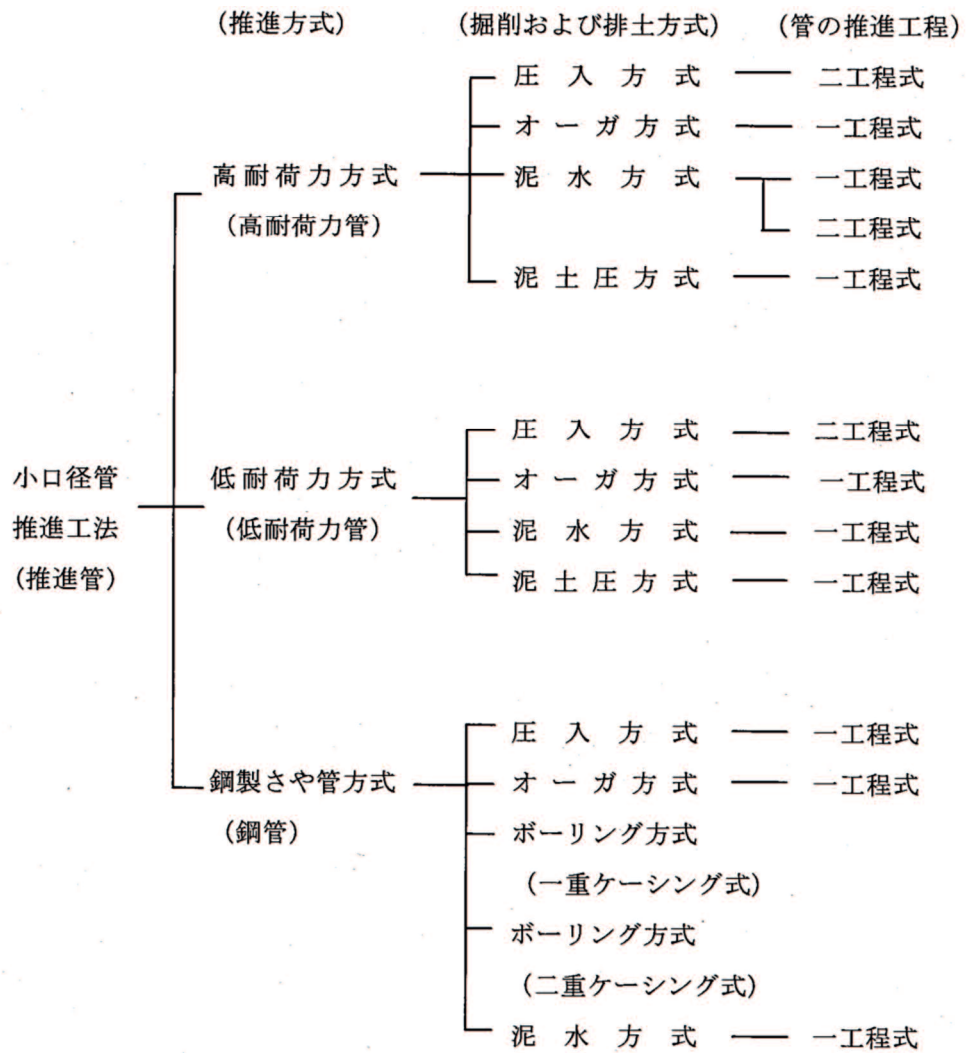


図 5.2.1 小口径推進工法の分類⁵⁴⁾

このうち、低耐荷力方式では、推進管（VP 管）に先導体の先端抵抗を作用させず、周面抵抗力だけを作用させる工法となっている。

5.2.2 各工法の概要

(1) 圧入方式二工程式

この方式は、一工程目で、先導体および誘導管を無排土で圧入し、到達させる。方向修正は先導体を回転させることで行う。その後、拡大ヘッドおよびスクリーコンベアを内装した推進管を誘導管の後端に取り付け、到達立坑で誘導管を回収しながら推進管を押し込んでいく。図 5.2.2 に、圧入方式二工程式の概要図を示す。第 4 章の実施工では、この方式によりガイドパイプの敷設を行った。

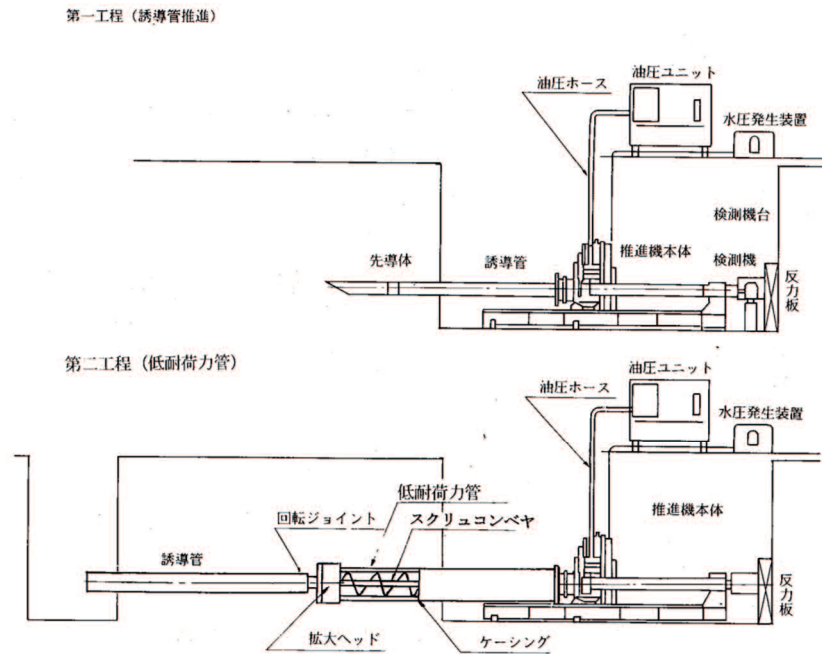


図 5.2.2 圧入方式二工程式⁵⁴⁾

(2) オーガ方式一工程式（泥土圧方式）

内部にスクリーオーガを内装したケーシングにより、先頭のオーガヘッドを地山に押し付け、掘削を行う。方向修正は、オーガヘッド後方の方向修正用ジャッキにて行う。ケーシング内にピンチ弁による止水構造の有無で、オーガ方式と泥土圧方式に分類される。図 5.2.3 にオーガ方式一工程式（泥土圧方式）の概要を示す。

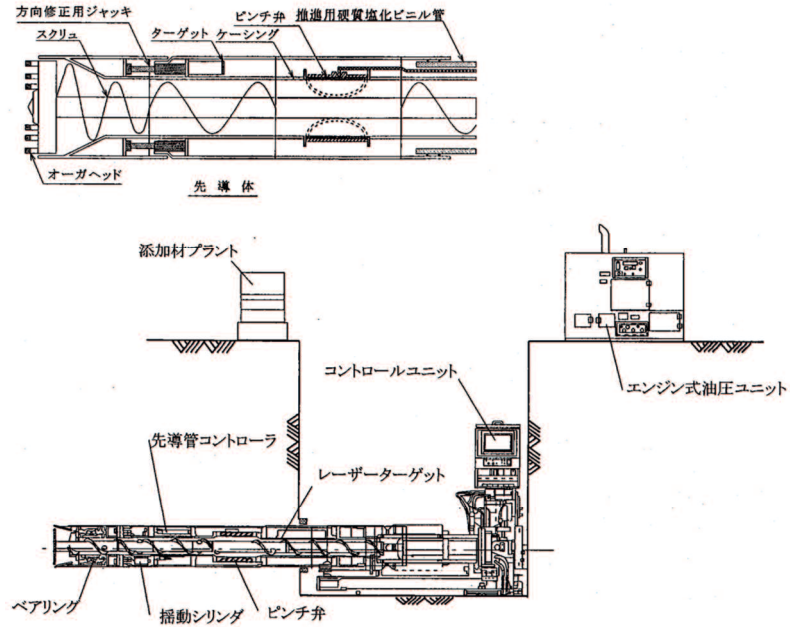


図 5.2.2 オーガ方式一工程式⁵⁴⁾

(3) 泥水方式一工程式

先端のカッタを前方地山に押し付けながら掘進し、排土は泥水とともに、バキュームポンプでプラントに送泥される。その他の部分は、オーガ方式、泥土圧方式と同様である。図 5.2.4 に泥水方式一工程式の概要を示す。

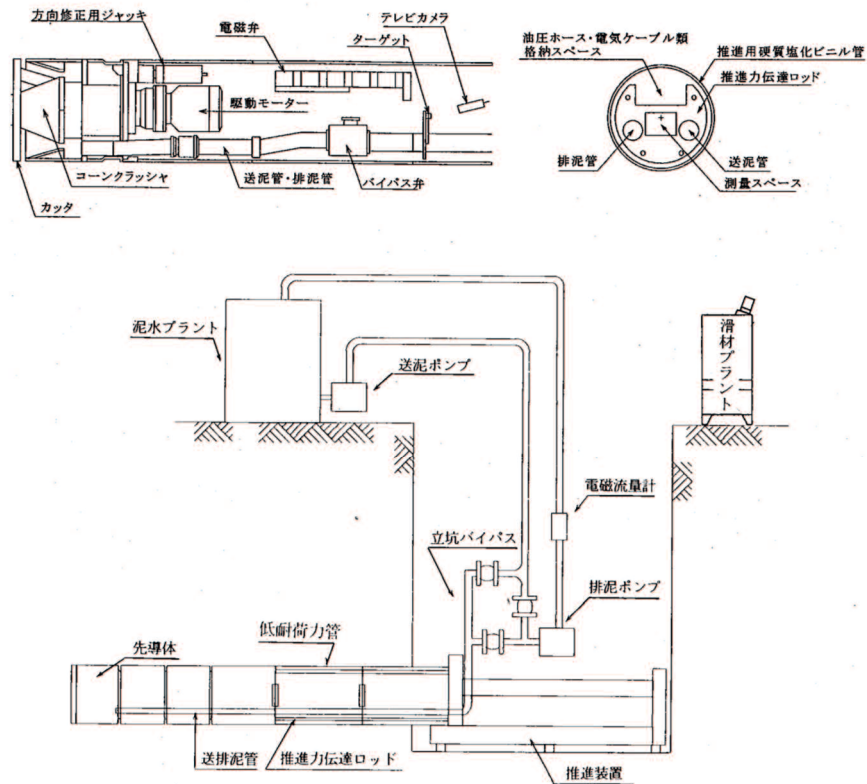


図 5.2.3 泥水方式一工程式⁵⁴⁾

5.2.3 土質条件と地下水压への適用性

低耐荷力方式の各方式別土質条件および地下水压への適用性を以下に示す。これより、施工条件に適合した工法を選定する。

表 5.2.1 土質条件と地下水位からの適用判定表⁵⁴⁾

土質分類	土質性状		低耐荷力方式			
	N 値	地下水压 (kN/m ²)	圧入方式	オーガ方式	泥水方式	泥土圧方式
			二工程式	一工程式	一工程式	一工程式
粘性土	N<1	—	○	×	×	×
	1≦N≦15	—	○	○	○	○
	15<N≦20	—	○	○	○	○
	20<N≦30	—	×	○	○	○
	30<N≦40	—	×	○	○	○
砂質土	N≦30	≦10	○	○	○	○
		10～20	△	△	○	○
		20～40	△	×	○	○
		40～60	×	×	○	○
		60～100	×	×	○	×
	30<N≦40	≦10	○	○	○	○
		10～20	△	△	○	○
		20～40	△	×	○	○
		40～60	×	×	○	○
		60～100	×	×	○	×
	40<N≦50	≦10	×	○	○	○
		10～20	×	△	○	○
		20～40	×	×	○	○
		40～60	×	×	○	○
		60～100	×	×	○	×

ここに、○：一般的に適用できる，△：適用にあたっては検討を要する，×：一般的に適用できない

5. 3 標準エレメント寸法

第4章で実施工での開発工法のエレメント寸法決定に当っては、その運搬時の使用車両を考慮し、エレメントサイズを決定した。しかし、実際に刃口およびエレメントの運搬にあたり、実車両の荷台寸法を検証したところ積載可能な荷台幅を超過しており、結果的に大型トレーラを使用する必要があることが判明し、輸送コストの増大につながった。そのため、今後の工法の普及展開のため、汎用性のある大型トラックでの輸送が可能なエレメントおよび刃口寸法を決定する。

5.3.1 HEP&JES 工法における標準エレメント寸法

開発工法のベースとなった HEP&JES 工法のエレメントの標準寸法は、以下のように定められている。

まず、当該工法の実現のために噛み合わせ継手が開発された⁵⁵⁾。この噛み合わせ継手は十分な降伏耐力と列車荷重などの繰り返し荷重に対し十分な疲労耐力を有していること、かん合抵抗が小さい継手形状であること、を要求性能として、低コストで大量供給に対応できる熱間圧延による製造可能な形状・材質で開発された⁵⁶⁾。結果的に、熱間圧延で製造された噛み合わせ継手は、写真 5.3.1 に示すように、幅 500mm、継手部につながる直線部の板厚は 16mm となっており、HEP&JES 工法で使用するエレメントは、これを 2 つに切断した後に板厚 16mm の鋼板と溶接し図 5.3.1 に示す断面形状のエレメントを製作する。

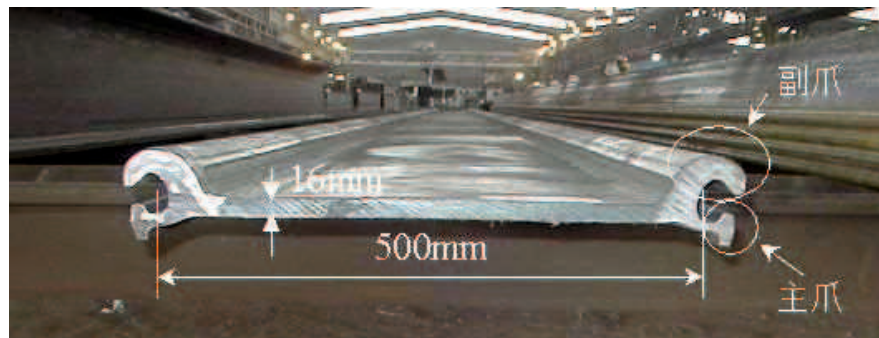


写真 5.3.1 熱間圧延で製造された噛み合わせ継手⁵⁵⁾

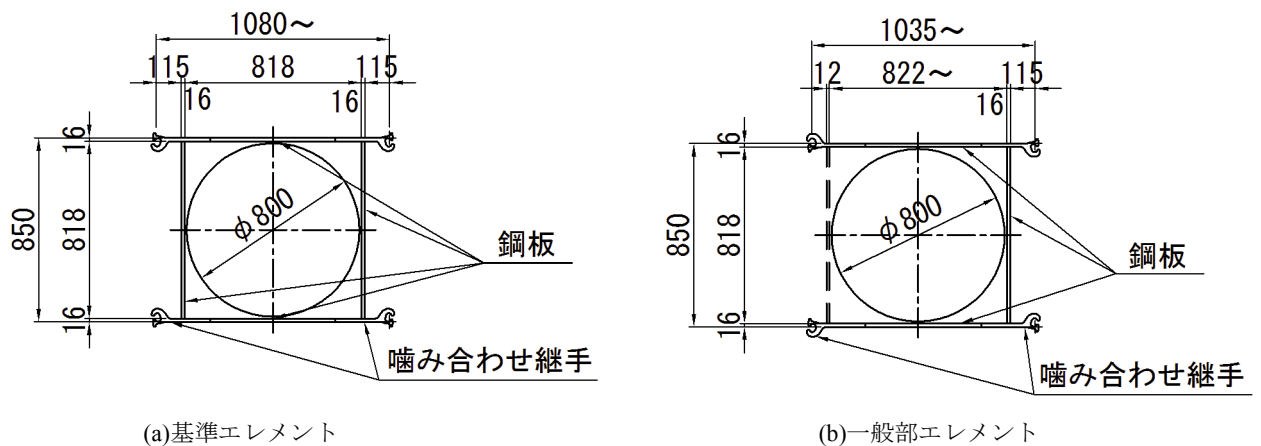


図 5.3.1 HEP&JES 工法で使用する標準的なエレメント寸法

この場合、施工中の中空エレメントの過大な変形やエレメントに対する過度の残留応力を残すことのないよう、図 5.3.2 に示す骨組解析モデルにより安全性の検証を行っている⁵⁹⁾。第 4 章で示した実施工での開発工法のエレメント寸法決定に当たっても、同様の骨組解析により安全性を検証し、図 5.3.3 に示す形状を標準としていた。

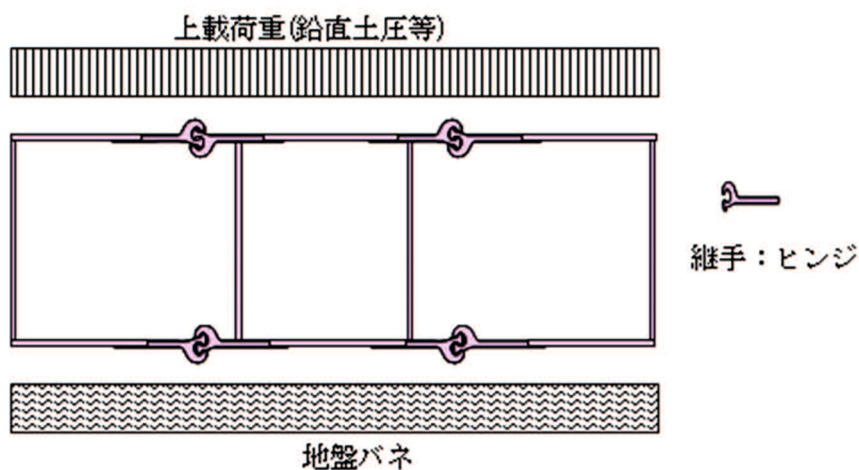


図 5.3.2 中空時のエレメントの検討モデルの例⁵⁹⁾

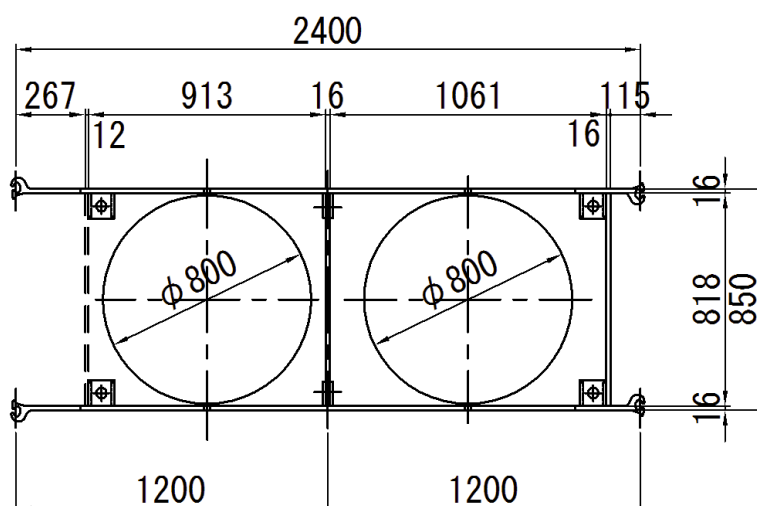


図 5.3.3 開発工法に適用したエレメント寸法

5.3.2 運搬に関する法令・規制

まず、エレメントの運搬にあたっては、公道における運搬に関する法令・規制として、①道路法、②道路交通法、③道路運送車両法（通称「道路3法」）のそれぞれに規定される制限を受けることになる。表 5.3.1 は「道路3法」の比較を示すものである。

表 5.3.1 道路3法における記載内容の比較

法 律		①道路法 (道路構造)	②道路交通法 (道路交通)	③道路運送車両法 (車両構造)
所轄官庁		国土交通省 (道路局)	警察庁	国土交通省 (自動車交通局)
規定の内容		道路の管理に関する制限	運転免許や交通ルールに 関すること	車両の大きさ、重量の制 限、登録に関すること、保 安基準等
政省令		車両制限令	道路交通法施行令	道路運送車両の保安基準
政省令の内容		道路を通行できる車両の幅 ／重量／高さ／最小回転半 径の最高制限を	交通安全上の観点から積 載物の重量／長さ／幅／ 高さの最高限度を定めて いる	車両(空車状態)の長さ／幅 ／高さ／車両総重量／最 大安定傾斜角等の構造の 基準を定めている
制限値	幅	<u>積載状態で 2.5m 以下</u>	<u>貨物は車両の幅を超えな いこと</u>	<u>貨物は関係なく車両の幅 は 2.5m 以下</u>
	長さ	積載状態で 12m 以下(*)	車両の長さの 10%を超えた はみ出し禁止	車両の全長 12m 以下
	高さ	積載状態で 3.8m 以下 (指定道路は 4.1m 以下)	積載状態で 3.8m	車両の高さ 3.8m 以下
	総重量	道路、車軸、車長に応じて 20～25t(*)	規定なし (車検証の記載値)	車軸、車長に応じて 20～25t
	軸重	10t 以下	規定なし	10t 以下
	輪荷重	5t 以下	規定なし	5t 以下
	最小回転 半径	12m 以下	規定なし	12m 以下
制限値超、基準不適 合車両		道路を通行できない	車両を運転してはなら ない	運行の用に供してはなら ない

(*)：一部の連結車(トレーラ)については特例が適用される。

①道路法（道路構造）・・・・・・・・・・積載状態での制限値を規定

②道路交通法（道路交通）・・・・・・・・・・積載物の制限値を規定

③道路運送車両法（車両構造）・・・・・・・・空車状態の車両の制限値を規定（車両そのものの規定）

※表 5.3.1 に示す「①道路法」に定められる「制限値」をひとつでも超える車両を「特殊車両」という。

表 5.3.1 に示す制限値を超えた車両が道路を通行する場合には、表 5.3.2 に示す許可・認定が必要となる。

表 5.3.2 「特殊車両」等の通行に関連ある許可・認定

法 律		①道路法	②道路交通法	③道路運送車両法
①政省令		車両制限令	道路交通法施行令	道路運送車両の保安基準
②特殊車両等の通行に必要な許可申請		「特殊車両通行許可」申請	「制限外積載許可」申請	「基準緩和自動車の認定」申請
	申請者	輸送業者	運転手(輸送業者)	トレーラ／トラック(荷台)の製作者
	申請先	道路管理者(*1) ・国道→国土交通大臣 ・都道府県道→ 都道府県知事 ・市町村道→市町村長	都道府県公安委員会 警察署長(出発地管轄)	国土交通大臣 (地方運輸局長)
	申請	・道路管理者に許可申請を提出 ・道路管理者は基準に従って必要な審査を行い、必要な条件(*2)を付して特殊車両の通行許可を与える ・許可時には許可証が交付される ・許可証は運行車両に備え付ける	・出発地管轄の警察署長に許可申請提出 ・署長は基準に従い審査を行う ・許可時には許可証が交付される。車両に備え付ける。 ・原則、許可は1回の運搬毎に行う。 但し、要件(*3)を満たす場合は包括して1回の運搬と見なして処理が可能。	・保安基準緩和を受けなければ運行できない自動車を使用する時に申請。 但し、自動車の登録時に必要な申請であり、運搬にあたっては保安基準緩和を受けたセミトレーラが使用されるため、運搬毎の道路運送車両法上の許可は必要ない。
	申請～許可の処理時間	新規、変更処理 →3週間以内 更新申請→2週間以内 新規(個別審査) →1～2ヶ月	5日 (行政庁の休日含まれない)	
	許可有効期間	殆どのケースで1年間。 (許可を継続する場合は更新申請が必要) 個別審査となる場合は6ヶ月となる。	原則、1回の運搬行為の開始～終了までの期間。但し、要件(*3)を満たす場合については許可期間を3ヶ月以内とする。	

注)*1：申請経路が国道と都道府県道の2つ以上にまたがる場合は、どちらかの道路管理者への申請でよい

*2：通行条件(徐行，連行禁止，誘導車の配置等)が付される

*3：要件 (1)車両が同一であること(2)同一品目の貨物を同一の積載方法で運搬すること(3)運転経路が同一であること

運搬に関わる法令・規制及びそれに基づく許可・認定から，広幅エレメントを運搬する際には，以下の点に留意する必要がある。

○本開発工法のエレメントの運搬においては，幅の制限値に着目する必要がある，制限値を超える場合に関わる法令は「道路法」と「道路交通法」である。これら法令の制限値を超えて運搬をするためには，「特殊車両通行許可申請」と「制限外積載許可申請」の両方がいずれかを申請し，通行許可を得る必要がある。

○上記許可申請に関わる費用は決して高額ではないが，許可申請においては車両を限定しなければならず，納入時期の変更については自由度が小さくなり，工程等に支障をきたす可能性がある。

5.3.3 運搬車両

エレメント、切削刃口の運搬車両としては、大型トラック、トレーラ等を使用できるが、道路関連法令の制限を受けない一般的な車両（市場にける台数が多い車両）を運搬車両とすべきである。

(1)車両寸法

図 5.3.4 に一般的な大型トラックの寸法を示す。

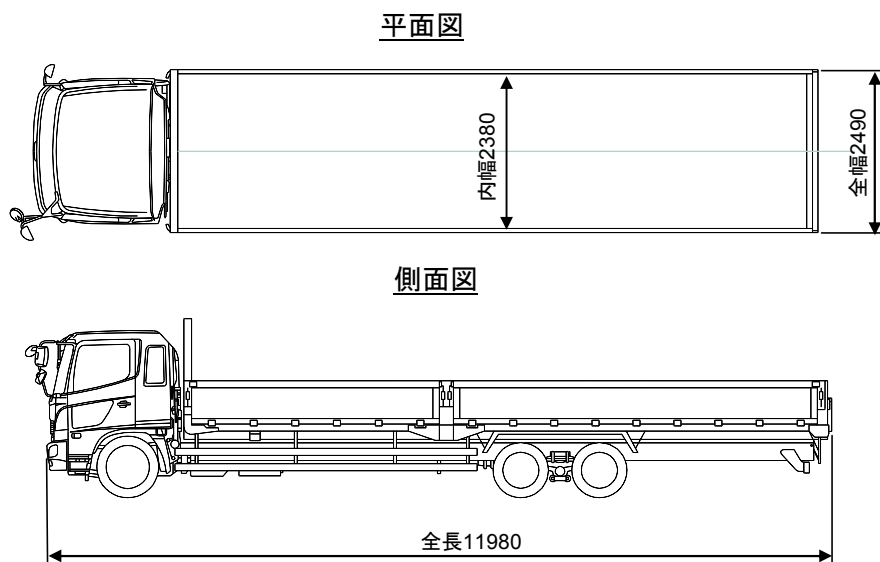


図 5.3.4 大型トラックの寸法

一般的な大型トラック（積載量 10～15t）の荷台幅（アオリ内側幅）はメーカーによって若干異なるが、2380mm 程度であり、全幅は「道路運送車両法」をクリアできるほぼ限界の幅である 2490mm となっている。また、全長も「道路運送車両法」をクリアできるほぼ限界の長さである 11980mm となっている。

また、積載物は固定する必要があるので、荷台には固定用の金具が装備されているが、金具の取り付け位置は荷台内にあり、アオリを倒して車両の全幅一杯までの積載は可能であるが、標準装備の固定用金具での固定ができず、安全上、車両の走行はできない。また、別途固定用金具を装着し固定しても固定具により制限値を超えることになり、特殊車両等の通行許可申請が必要となる。

(2)荷台構造

図 5.3.5 に荷台構造の模式図を示す。エレメントをワイヤーロープ等で固定する場合には、内側及び外側荷締用フックのうち外側のフックを使用する。

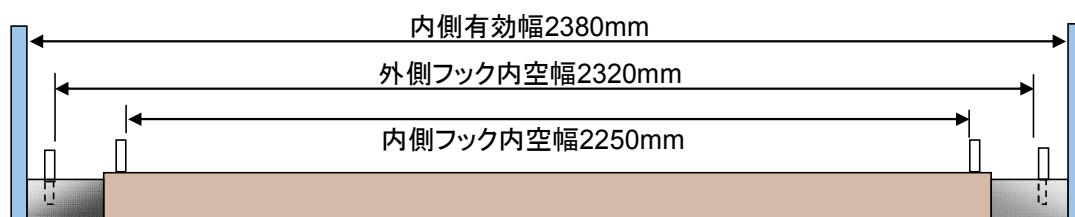


図 5.3.5 荷台構造概要図

写真 5.3.2～7 に大型トラックの荷台および積載物固定用フックの状況を示す.

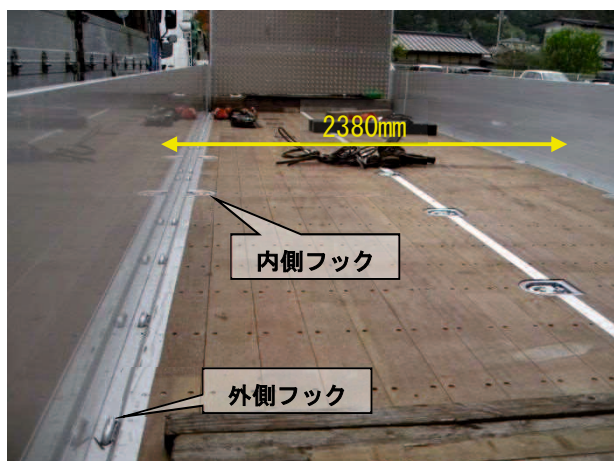


写真 5.3.2 荷台全景(1)

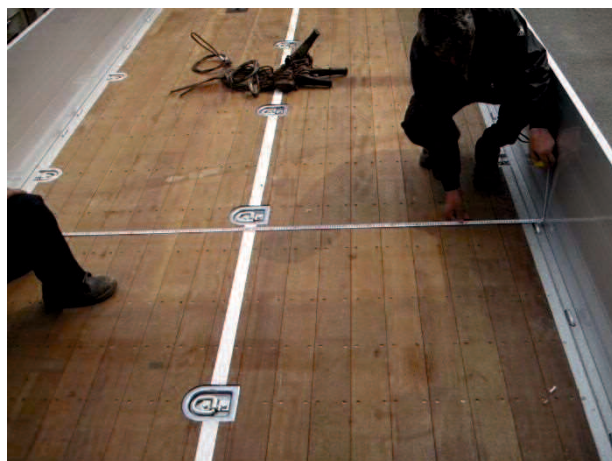


写真 5.3.3 荷台全景(2)

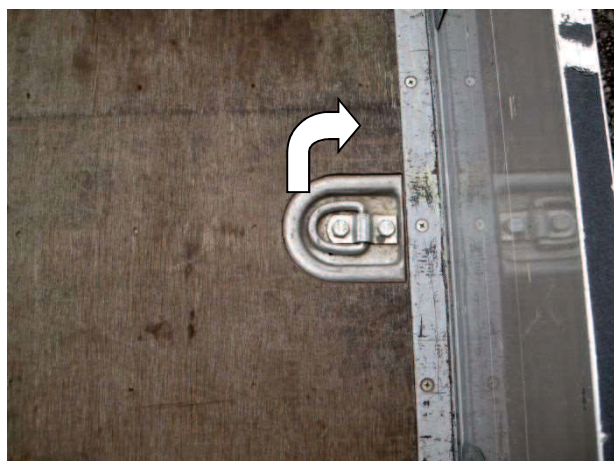


写真 5.3.4 内側フック(1)



写真 5.3.5 内側フック(2)



写真 5.3.6 外側フック(1)

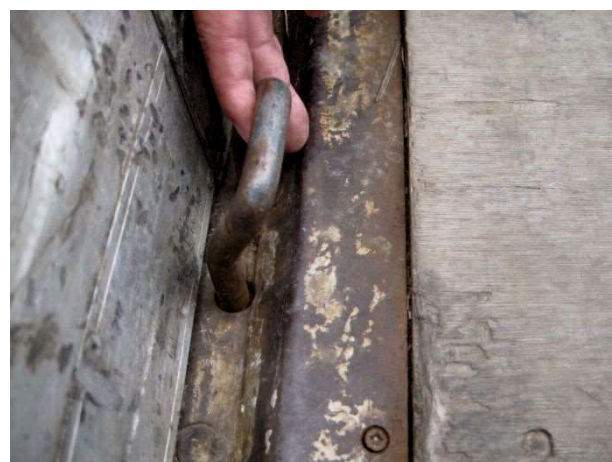


写真 5.3.7 外側フック(2)

5.3.4 エレメントおよび刃口の標準寸法

エレメントの標準断面および刃口寸法の設定においては、一般的な運搬車両に積載可能で、道路関連法令の制限値を超えて許可申請が必要とならないように配慮すべきである。また、施工性が確保でき、安全性を損ねないように標準寸法を設定しなければならない。

(1) 実施工適用時の検証

第3章における実施工への適用時に採用したエレメント、切削刃口の外幅は図5.3.6の通り、それぞれ、2440mm 及び 2580mm である。「道路法」による制限値をエレメントは下回っているが、切削刃口については上回っており、刃口を運搬する車両は「特殊車両」となる。

エレメントについては寸法上、「道路法」の制限値を満足するが、前述のように、一般的な大型車にはアオリを倒さなければ積載できず、また、荷台に装備されている荷締用フックが使用できず固定できない。従って、エレメント及び切削刃口とも、一般的な大型トラックでは運搬できず、セミトレーラによって運搬することとなった。また、運搬においては「道路法」及び「道路交通法」の制限値を超過することとなったので、「特殊車両通行許可」及び「制限外積載許可」を取得することとなった。車両台数の限定されるセミトレーラの使用と「特殊車両等通行許可」及び「制限外積載許可」の取得による車両の限定によって、コストアップと運搬工程に制約が発生した。

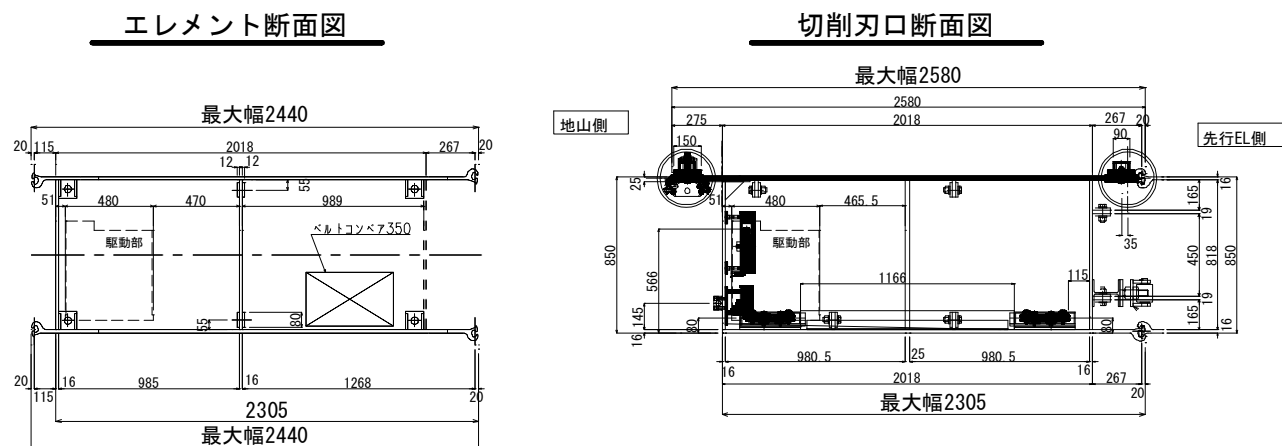


図 5.3.6 実施工適用時のエレメントおよび刃口寸法

(2) エレメント標準寸法の設定

エレメントの運搬において制約を受けないエレメントの標準寸法は、一般的な大型トラックの荷台構造から設定する必要がある。つまり、エレメントの標準寸法（最大エレメント幅）は、荷台の内側有効幅内（アオリ内側幅）に収まり、固定（荷締め）が可能であることとなる。従って、エレメントの標準幅（最大幅）は、荷台内側有効幅：2380mm から、エレメントの固定に必要なワイヤー、保護材分の余裕 100mm を差し引いた 2280mm となる。

図 5.3.7 に開発工法用のエレメント標準寸法（案）を示す。

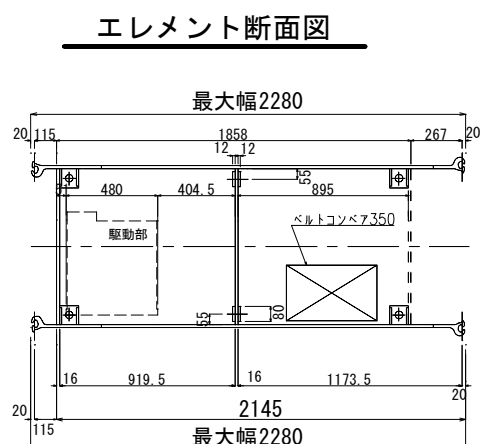


図 5.3.7 エレメント標準寸法（案）

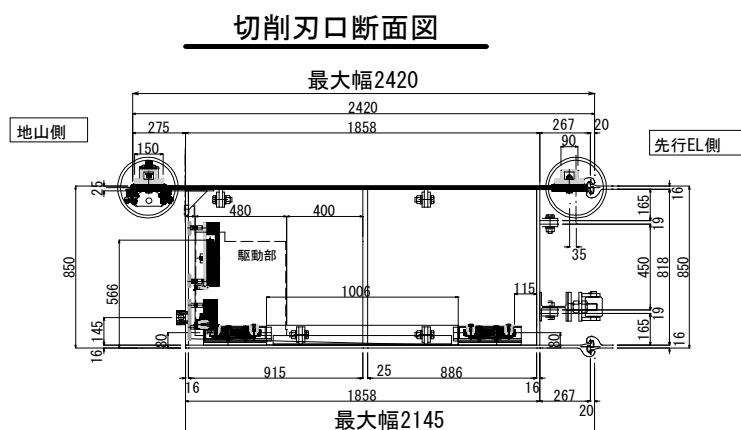


図 5.3.8 刃口標準寸法（案）

c) 刃口標準寸法の設定

切削刃口断面については、先に設定したエレメント寸法を合わせ、まず、運搬条件より設定する。図 5.3.8 は図 5.3.7 の標準エレメント寸法（案）を基に設定した切削刃口の案であり、上幅が 2420mm、下幅が 2145mm となる。

切削刃口断面は刃口に装備・装着する機器材、治具等の収まり、刃口内での空間確保による施工性及び安全性の確認をした上で設定する。今回設定した切削刃口は実施工適用時の切削刃口より幅が縮小するので、刃口内部の機器構造等の改良によりできるだけ大きな空間を確保する。

運搬上制約のない最大エレメント幅は 2280mm であり、二ツ家 Bv 採用のエレメント幅 2440mm と比較して 160mm 縮小し、これによって内空幅も 160mm 縮小している。これより、刃口中央の仕切板を境にして嵌合側（先行側）内空幅と地山側内空幅はそれぞれ 80mm 縮小するため、少しでも内空を確保できるよう、JES 継手嵌合側の自在プーリー（刃口内側面に設置されるプーリー）を図 5.3.9 に示すように、30mm 壁側に移設改良して、それぞれの内空幅の縮小を 65mm とする。これにより、嵌合側内空幅と地山側内空幅は 750mm となり、人力掘削の作業スペースを確保できる。

なお、刃口上幅はアオリ内側幅を超えるが刃口上面はアオリ天端より上方となるので積載可能であり、車両幅を超過することなく固定が可能である。

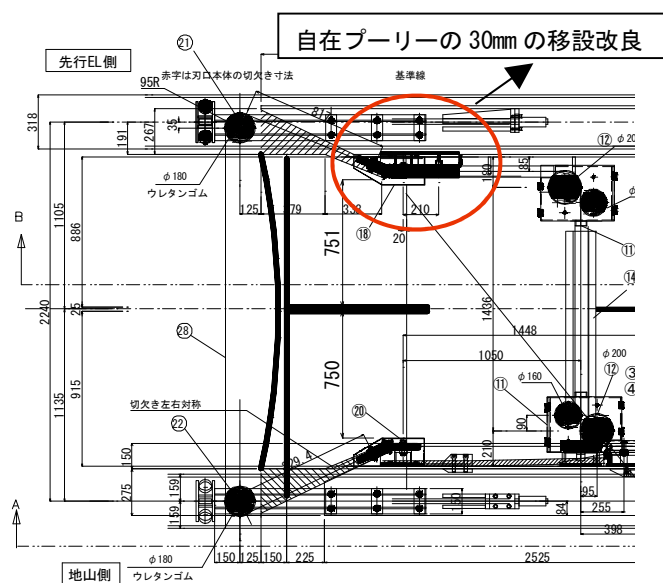


図 5.3.9 機器構造の改良（案）

d)標準エレメントおよび刃口寸法
 運搬上の制約を回避でき、施工性及び安全性が確保できる、開発工法用の標準エレメント及び
 切削刃口は図 5.3.10 の通りとなる。

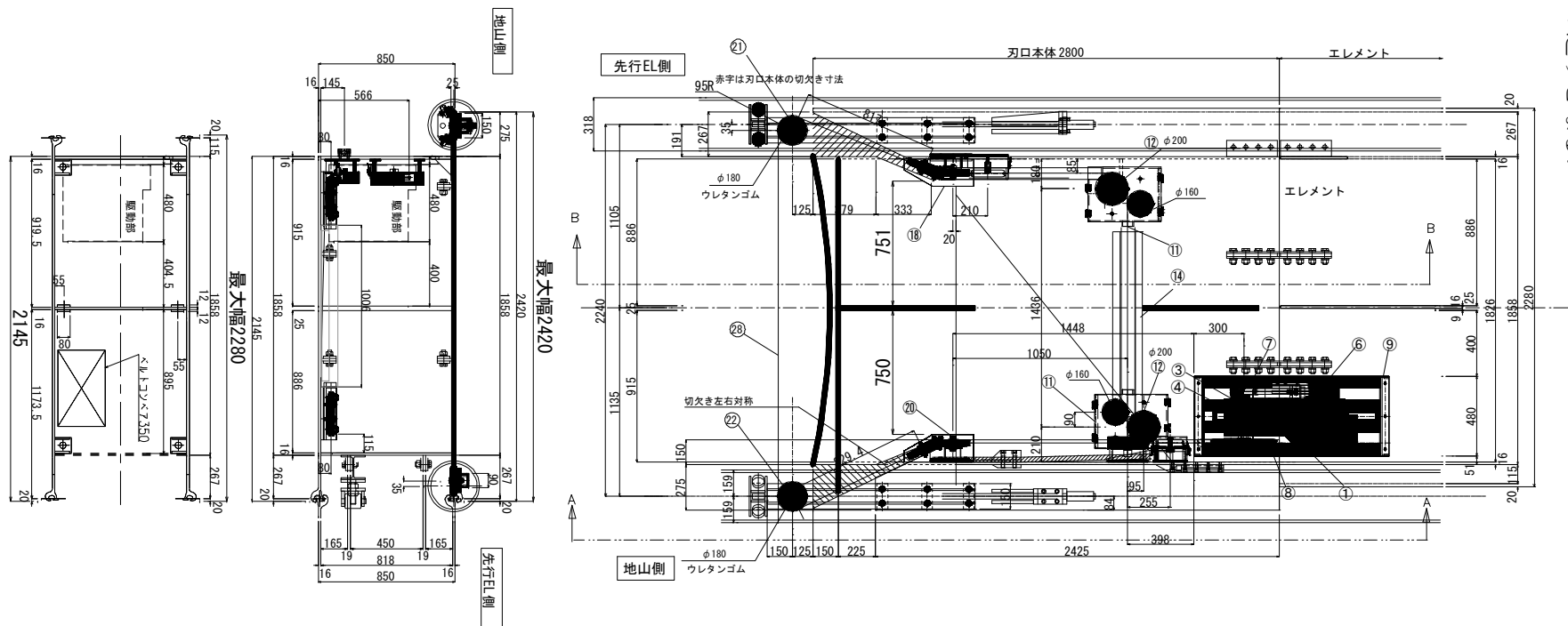


図 5.3.10 開発工法におけるエレメントおよび刃口の標準（最大）寸法（案）

5. 4 計測項目

今回の研究を通じて得られた知見より，開発工法を適用するにあたり，掘進管理に必要な計測項目を以下に示す．開発工法では，従来の HEP&JES 工法で必要とされていた計測項目に加え，地盤切削機構に関する計測項目が付加されている．また，必要に応じて，それぞれの計測項目に管理値を設け，異常が発生した場合に，安全対策として，運転を停止したり，異常の発生を知らせる信号を中央監視盤に通報するよう設定されている．表 5.4.1 に必要とされる計測項目を，図 5.4.1 にシステム構成を，図 5.4.2 に制御関係システム構成図を示す．

表 5.4.1 施工管理で必要とされる計測管理項目

項 目	計測項目	計測方法
施工管理データ	a)けん引力	けん引ジャッキ油圧
	b)掘進距離	ロータリーエンコーダ
	c)掘進速度	掘進距離より換算
	d)刃口姿勢	ローテティングレーザ，電子レベルメジャー 傾斜計
	e)エレメント敷設精度	測量
切削装置データ	a)ワイヤー走行時間	モータ運転時間
	b)ワイヤー速度	補助プーリー回転速度より演算
	c)ワイヤー抵抗	インバータ出力データ(電流値)
	d)ワイヤー切削距離	ワイヤー速度×運転時間
	e)ワイヤー張力	テンション用シリンダ空気圧
	f)ワイヤー遅れ量	テンション用シリンダ伸び量より換算
	g)ワイヤー磨耗状況	目視および実測
	h)プーリー磨耗状況	目視および実測

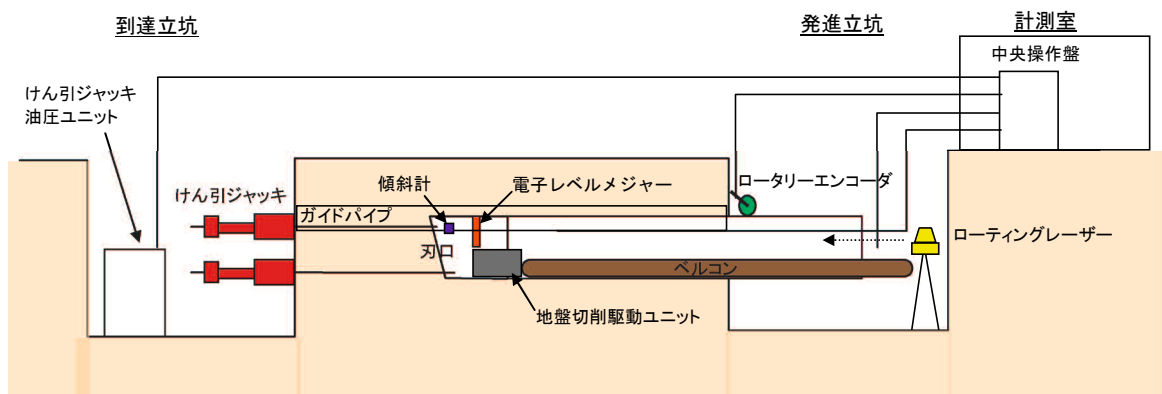


図 5.4.1 掘進管理システム構成図

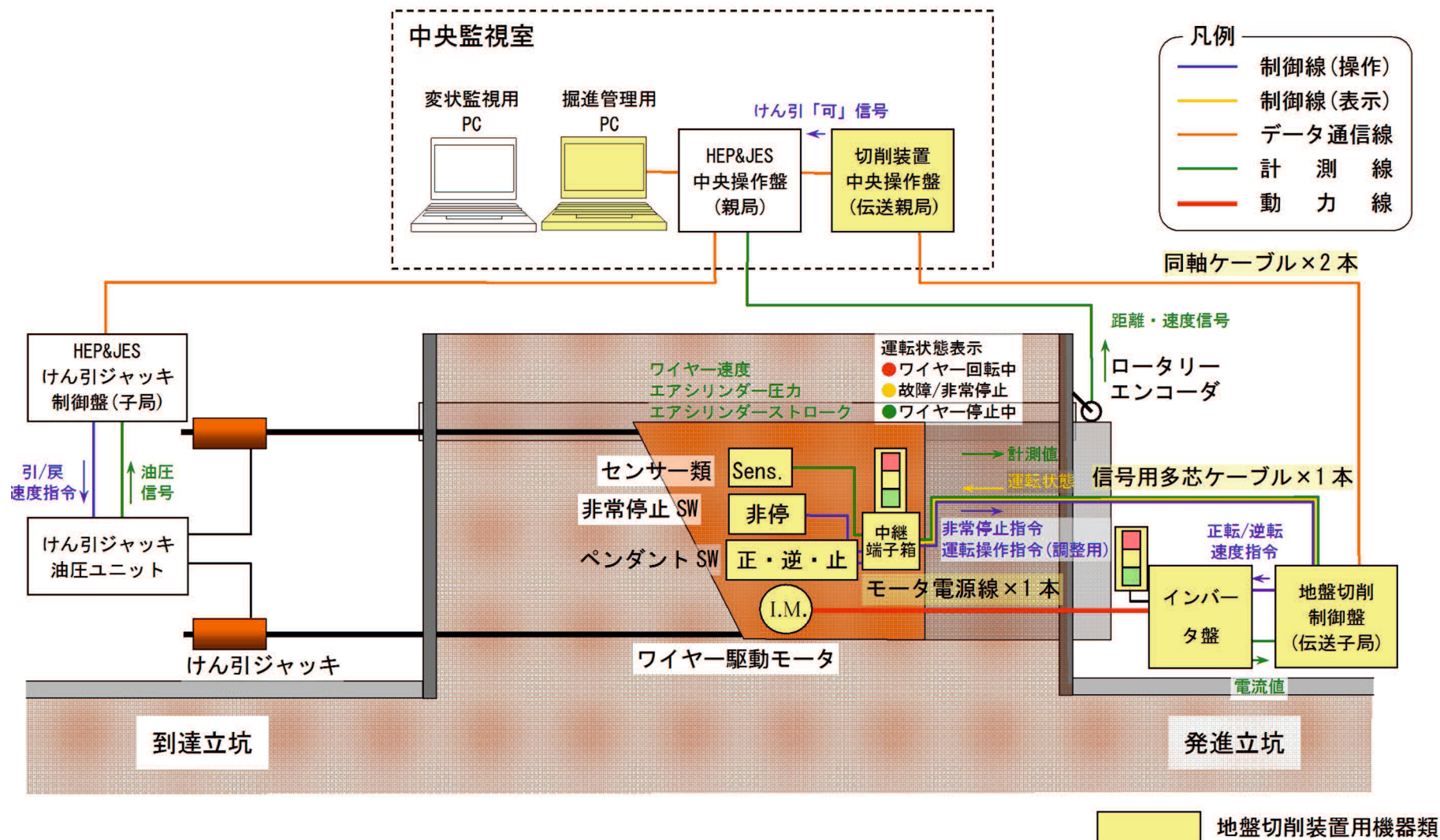


図 5.4.2 制御系システム構成図

表 5.4.1 に示した計測項目のうち、安全対策機能を付加したものについて、以下に示す。

(1) 施工管理データ

a) けん引力、b) 掘進距離

第 2 章で示したけん引力と掘進距離を参考に、掘進距離により想定されるけん引力を大きく超過（通常 20% 程度）した場合や、短い掘進距離の中で急激にけん引力が増加した場合に、自動でけん引を停止する機構を有している。

(2) 切削装置データ

c) ワイヤ抵抗

切削ワイヤの切削抵抗が過大になった際、切削装置保護のため駆動モータの電流値が上限（定格電流値から決定される）を超えた場合に装置を自動停止させる。

e) ワイヤ張力

ワイヤ張力はテンション用シリンダに、レギュレータで一定圧力に調整された圧縮空気を供給することで導入されており、圧縮空気の供給異常などで圧力が低下するとプーリーから切削ワイヤが脱落するおそれがある。そのため、空気圧が下限値を下回った場合に切削装置を自動停止させる。

f) ワイヤ遅れ量

支障物切断時は、けん引速度が掘進方向へ切削が進行する速度を上回ることがある。その場合、テンション用シリンダが適宜縮むことによってワイヤ張力を一定に保ちつつ、切羽側へ切削ワイヤを繰出すことで、その速度差を吸収して一時的に切削遅れを許容する。ただし、その繰出し量が過大になると切削ワイヤが刃口先端の先行ループに接触する。これを防ぐため、切削ワイヤの初期セット時のテンション用シリンダ長と、切削時のシリンダ長との差を切羽側へのワイヤの繰出し量（＝ワイヤの遅れ量）とみなし最大値を超えた場合は、切削装置の運転は継続させながら、けん引を自動停止する。

そのほか、掘進作業時は地盤切削装置が正常稼動中でなければ、けん引操作ができないようインターロックが組んであり、切削ワイヤや先端ループの無理な押し込みによるトラブルを防いでいる。

掘進管理にあたっては、施工箇所直上の軌道や道路面等の計測管理データもリアルタイムで監視できるよう計画し、異常値が認められた場合は、一旦施工を中止し、その原因を確認し、対策を講じた後に掘進再開するよう心がけることが重要である。

5. 5 まとめ

本章では、開発工法の普及展開にあたり必要となる施工計画時の検討事項等について、とりまとめた。

まず、開発工法の適用範囲を定める方法として、人力掘削時の切羽安定性に対する検討方法と上戴土砂の滑動に対する検討方法を示し、試算により土質と土かぶりに対する適用範囲を示している。また、適用範囲を外れる場合にとるべき対策についても示した。

次に、地盤切削を併用しながらエレメントを掘進する際に、事前施工として実施するガイドパイプ（硬質ポリ塩化ビニル管：φ300mm）の土質条件や地下水水圧に対する施工方法の適否を示した。開発工法では、ガイドパイプをガイドとしてエレメント掘進を行うため、高い精度が求められるため、下水管の設置等で実績のある小口径管推進工法のうち、低耐荷力方式を採用している。

また、開発工法で使用する鋼製エレメントの標準寸法の考え方について論じている。鋼製エレメントは、内部に作業員が入る関係より、安全上必要な内空を確保するとともに、中空状態で上戴荷重に対する安全性を確保することからその標準的な形状を決定している。また、工法全体の経済性を考慮し、運搬にあたって特殊車両を必要としない最大寸法を示している。

最後に、開発工法を実施する際に必要となる計測項目を示している。必要な計測項目は、エレメント掘進に関する項目、地盤切削に関する項目があり、いずれも情報化施工のために必要となる項目である。また、異常時に自動的に停止する等、安全対策も考慮している。

本開発工法の適用にあたっては、本章で述べた検討項目や留意事項を考慮した施工計画を策定することにより、安全で効率的な施工とすることが可能である。

第6章 結 論

本研究は、すでに実用化されているエレメント掘進工法を、より安全で確実なエレメント掘進工法に改良し、実物大の実証試験を繰り返すことにより、改良型エレメント掘進工法を確立し、実施工への適用を図ることで、その有効性、実用性を検証した。また、実施工からのフィードバックによって、改良型工法の一般化を図り、今後の普及展開への方向性を示している。

本論文の概要ならびに、得られた知見について以下に示す。

第1章では、本研究の背景ならびに、研究の対象としたアンダーパス工法の特殊性について、先行技術の概要について概観している。また、開発工法の理解を深めることを目的として、ベースとした HEP&JES 工法を含む先行技術について、その工法の特徴および開発経緯、概要について詳述し、過去の研究より、従来の非開削工法における課題を抽出し、本研究の目的および開発工法の目標性能として、

- a) 構造物の必要内空を確実に確保できるエレメント設置精度を有すること。
- b) エレメント周囲の余掘りを最小限とし、地表面への影響を極力小さくすること。
- c) 必要なエレメントけん引力を極力小さくし、簡易な設備での施工を可能とすること。
- d) 土かぶりの小さな箇所での出現の可能性の高い、玉石やコンクリート塊や残置された基礎等の支障物による施工不能や、押し込みや除去後の空洞による地表面影響を発生させない施工法とすること。

を掲げている。

第2章では、HEP&JES 工法および他の従来工法に対し、より施工時の地表面影響を低減し、安全性を高めた工法として、目標性能を有した新しいエレメント掘進工法を考案し、 $L=20\text{m} \times 2$ 本の実物大エレメントによる実証掘進試験により、その実用性について検証した。

まず、図 6.1.1、写真 6.1.1 に示すような、地盤を刃口上面に沿わせて回転するよう設置したワ

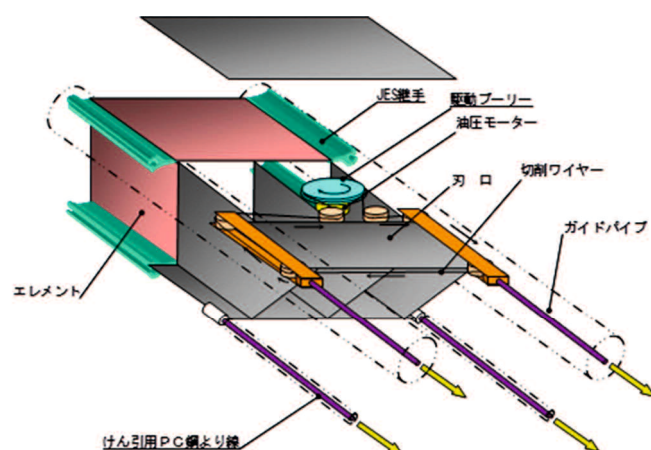


図 6.1.1 地盤切削刃口概要図

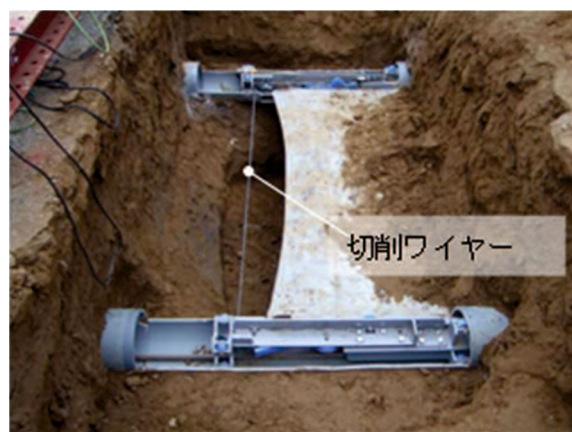


写真 6.1.1 刃口先端部ワイヤー位置

ワイヤーにより切削し、刃口上面の先行ルーフを前方の地盤に挿入しながら掘進する刃口を考案した。この際、刃口の横幅は、函体の構築速度を確保することと刃口内部での作業性を考慮し、従来の2倍程度の横幅とした。

地盤切削ワイヤーについては、通常のワイヤーソー工事で用いられるダイヤモンド砥粒を埋め込んだビーズを一定間隔に装着したダイヤモンドワイヤーのうち、ワイヤーの冷却に水を使用しない無水タイプのものを選定し、地盤の切削性や玉石、木片、コンクリート片の切削能力について事前に確認し、その実用性を検証した。

考案した地盤切削用刃口について、実物大の刃口を設計、製作し、これを用いた掘進試験により、開発工法が実際の施工に用いるだけの施工性を有することを検証し、以下の点についての知見を得た。

- ・本切削機構により、支障物等が混在する地盤においても、無水ワイヤーで切削し、確実に支障物を撤去でき、エレメント掘進可能であることを確認した。
- ・十分な剛性を有した刃口により、エレメント上面の摩擦低減を図ることで、地盤を切削した溝に先行ルーフを挿入していく方法によりけん引力も従来の工法に比べて小さくすることが可能であり、余掘りが少ないため、地表面影響を軽減できる。
- ・従来のレベルやトランシットによる一定間隔での測量管理によってでも、ある程度の掘進精度管理は可能である。しかし、横長のエレメントのため、ローリングに対しては、きめこまかな方向修正が必要である。
- ・耐久性向上のためには、油圧モーター、地盤切削ワイヤー、プーリーについて、再検討が必要である。

第3章では、まず、第2章の掘進試験で得られた課題である、地盤切削機構の耐久性と、図6.1.2に示すように、既設のエレメントと継手が勘合していない側の地盤反力が十分得られない場合、そちら側へ刃口が傾斜していく、いわゆるローリング現象が発生した際、エレメント精度の確保が困難となること、その対策について検討を行った。地盤切削機構の耐久性向上を目的とした、地盤切削用刃口のブラッシュアップを行った。具体的には、駆動系のトラブル防止のため、油圧モーターを電動モーターへ変更、ワイヤー切断の防止のため、端部を有さない環状の専用エンドレスワイヤーを開発および採用し、ワイヤーの脱落防止のためのプーリー配置の見直しを行った。

ローリング事象に対する対策として、図6.1.3に示すように刃口下面にテーパ部を設けることで、刃口下面全体をそりとして、地盤反力を得られるよう改良した。また、実物大の掘進試験により、このテーパ部により刃口前面の断面を縮小することで、前方の掘削断面のうち、下側の掘り残し量を調整する（掘削パターン）ことで、ローリング量を調整し、刃口の姿勢制御が可能であることを明らかにした。

掘進試験では、表6.1.1に示すように、毎掘進サイクルの最初にレーザーセンサーで計測した地山側の刃口高さ、計画高さの差により掘削パターンを選択していくことで、刃口

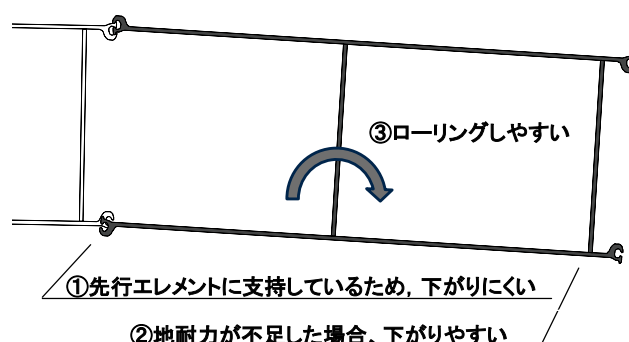


図 6.1.2 試験施工で確認されたローリング事象

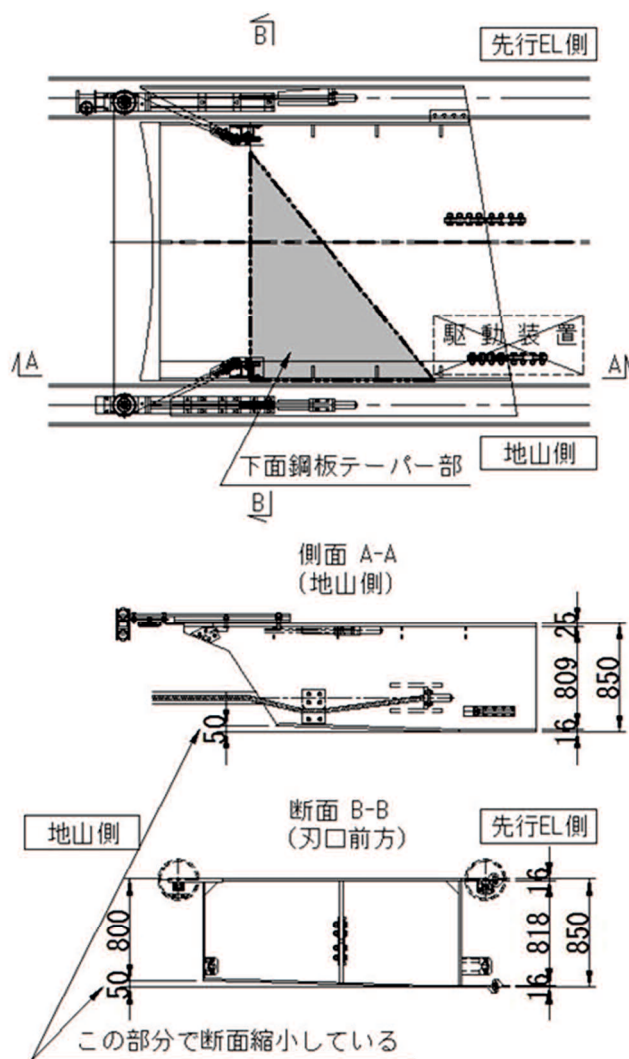


図 6.1.3 改良した刃口形状の概要

表 6.1.1 掘削パターン選定表

	前回けん引時の刃口の挙動	掘削パターン
下降 [2]	刃口高位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $6\text{mm} \leq \delta h < 3\text{mm}$	40mmすき取り
下降 [1]	刃口高位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $3\text{mm} \leq \delta h < 0\text{mm}$	30mmすき取り
上昇 [1]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $0\text{mm} \leq \delta h < -2\text{mm}$	20mmすき取り
上昇 [2]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-2\text{mm} \leq \delta h < -4\text{mm}$	10mmすき取り
上昇 [3]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-4\text{mm} \leq \delta h < -6\text{mm}$	50mm突き崩し
上昇 [4]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-6\text{mm} \leq \delta h < -8\text{mm}$	25mm突き崩し
上昇 [5]	刃口低位 エレメント計画高に対する 現在の刃口高さ $-8\text{mm} \leq \delta h < -10\text{mm}$	断面通り

の姿勢を制御し、計画高さから逸脱することなく掘進可能な、エレメント掘進方法確立した。この掘進試験で得られた成果および知見は、以下の通りである。

・駆動モーターのトラブル対策として、油圧モーターから電動モーターへの変更を行い、駆動系のトラブルなくエレメント掘進可能であることを確認した。

・プーリーの磨耗・損傷対策として、プーリーの必要数を最小限として、そのほとんどを交換の容易な刃口内に配置し、材質も耐久性に優れるゴム製に変更した。結果として、 $L=20\text{m}$ の掘進において、途中での交換なく掘進可能であることを確認した。

・切削ワイヤーをジョイントを有しないエンドレスワイヤーに変更し、またプーリーの直径を $\phi 200\text{mm}$ に統一することでワイヤーの曲げ半径を大きくしたことで、ワイヤーの破断に対する耐久性を向上し、 $L=20\text{m}$ の掘進において、途中での交換なく掘進可能であることを確認した。

・幅広のエレメントの掘進精度を向上させるためにはローリング対策を実施することが重要であり、刃口姿勢の計測と掘削方法を組み合わせることによる刃口の姿勢制御方法が確立できた。

・地盤切削ワイヤーで形成した土中の溝に刃口の先行ルーフを挿入していくことで、刃口の貫入抵抗を低減することを可能とした。

・本工法は、貫入抵抗を低減することにより、掘進による周辺地盤への影響低減を図ることが可能であり、さらにはエレメント上面の余掘りをほぼなくすことにより、地表面への影響を軽微と

することが可能であることが確認できた。

第4章では、考案した地盤切削刃口を用いたエレメント掘進工法を実際の施工に導入し、その実用性、効率性を検証した。JR 高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋において、上床版 $L=16.2\text{m}$ （掘進長 14.0m ）、土かぶり 1.4m 、縦断勾配 $i=0.3\%$ の条件で、列車運行時間帯を含む昼夜施工により、エレメント総数 20 本を施工した。この実績により、以下のような知見が得られたことにより、開発工法の実用性を確立したものとする。

- ・地盤切削機構は、実施工においても十分な施工性を有し、いくつも支障物に対し、エレメント断面内に支障する部分だけを切断撤去が可能であることを検証した。また、駆動系等のトラブルについては皆無であった。
- ・プーリーは、1 エレメント終了時に偏磨耗が認められたものを交換する程度であり、十分な耐久性を有していることを実証できた。
- ・地盤切削ワイヤーは、施工途中での破断は発生したが、あらかじめ定めた交換手順により、容易に交換可能であった。
- ・異なる地盤条件においても、リアルタイムで刃口高さを計測していることから、適切な掘削パターンを選定することにより、刃口姿勢制御が可能であることを明らかにした。
- ・けん引力は、従来のエレメント掘進工法に比べ小さいことを再度確認し、開発工法におけるけん引力の推定式への適合性を検証した。
- ・軌道計測の結果より、地表面（軌道）への影響も十分に小さいことを確認した。

第5章では、実施工の結果より、今後、開発工法を普及展開するにあたり、本工法の適用範囲の評価方法や、標準的なエレメント寸法等、必要となる施工計画上の留意点について述べている。本章はとりわけ新しい知見を示すものではないが、今後の開発工法の適用検討にあたり、本章に示す検討項目を参照、検討することにより、工法の安全性の向上や経済性に寄与するものと考えている。

以上のように、本研究では、踏切部での渋滞解消等、アンダーパスにおける立体交差化が求められる中で、従来工法の課題であった小土かぶり部での、エレメントの設置精度、上部地盤への影響、けん引・推進力の低減という課題に対し、全く新しい工法を考案し、実証試験を繰り返すことで、工法の有効性を検証、工法を確立し、実施工への適用により、その効果を検証した。また、今後の展開のためへの、適用範囲の設定やエレメントサイズの標準化、必要な計測項目等を示した。

本研究では、施工事例として示したものはひとつだけであるが、開発工法はその後もプロジェクト適用され、施工実績が積まれている。今後、本開発工法を普及展開し、これらの施工データを分析し、工法改良を進めていくことにより、将来的に、上部交通への影響リスクに対する厳密な対策が求められる新幹線盛土や高速道路下での低土かぶり施工への適用も可能とするものと考えている。

【参考文献】

第1章

- 1) 国土交通省：日本鉄道史, <http://www.milt.go.jp/common/000218983>, pp.24-25, 2012.7.25
- 2) 国土交通省：緊急対策踏切の取り組み状況等（平成24年度末）, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/fumikiri/pdf/fu_02_a.pdf, pp.1, 2013
- 3) 東京都建設局：西武池袋線（練馬高野台駅～大泉学園駅間）連続立体交差事業および複々線化事業, <http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/road/kensetsu/gaiyo/nerimatakanodai.html>
- 4) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：線路下横断工計画マニュアル, pp.17, 2004.12
- 5) 渡邊明之：閉合形状に曲げ加工した鉄筋の重ね継手の耐力に関する実験的研究, 早稲田大学博士論文, pp.3, 2008
- 6) 大川他：トンネル補助工法としてのパイプルーフ効果の計測と考察, 土木学会論文集, 第355号, VI-2, pp.100-108, 1985.3
- 7) 大谷他：パイプルーフ設計法としての弾性支承上梁モデルとその設計パラメータの提案, 土木学会論文集 F Vol.64 No.4, pp.450-462, 2008.12
- 8) アンダーパス技術協会：フロンテジャッキング工法 技術資料・積算資料, 2014.11
- 9) アンダーパス技術協会：アール・アンド・シー（R&C）工法技術資料・積算資料, 2014.11
- 10) 鉄道 ACT 研究会：COMPASS 工法技術資料,
- 11) アンダーパス技術協会：SFT 工法技術資料・積算資料, 2015.7
- 12) URT 協会：URT 工法技術資料（施工編）, 2016.3
- 13) URT 協会：PCR 工法 都市交通再生のアンダーパス工法（パンフレット）
- 14) URT 協会：PCR 工法 箱形トンネル形式 設計・計画・施工の手引き, 2011.3
- 15) 東日本旅客鉄道株式会社, 鉄建建設株式会社：先端建設技術・技術審査証明報告書「HEP&JES」工法, 財団法人先端建設技術センター, 2000.11
- 16) 山下康彦他：函体推進・けん引工法における施工データ分析, 土木学会第66回年次学術講演会講演集, III-132, pp.263-264, 2011.9
- 17) 岡野法之他：函体推進工法における函体推進時の現地計測, 土木学会第66回年次学術講演会講演集, III-133, pp.265-266, 2011.9
- 18) 中村智哉他：線路下での大断面函体推進工法における軌道変位抑制手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.10, pp.41-46, 2015.10
- 19) 有光武他：HEP 工法（エレメントけん引工法）のけん引試験結果, Structural Engineering Data, No. 7, pp. 52-57, JR 東日本, 1996.11.
- 20) 福本守ら：玉石混じり地盤における HEP&JES 工法の工期短縮と軌道変状対策に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会講演集, VI-051, pp.101-102, 2011.9

- 21) 柳民峰：パイプルーフ工法の余掘り掘削による地表面沈下特性に関する研究，京都大学大学院工学研究科博士論文，2007.3
- 22) 東日本旅客鉄道株式会社：線路下道路トンネル工事にともなう輸送トラブルの原因と再発防止対策について，JR 東日本プレスリリース，2006.6
- 23) 竹下貞雄：中掘り推進工法における推力と切削トルクに関する土質工学的研究，京都大学博士論文，1985.3
- 24) 竹下貞雄：中掘り推進工法における推力の推定とその低減対策，土木学会論文集，第 364 号，III-4，pp.239-248，1985.10
- 25) 茂木聡他：JES（Jointed Element Structure）工法の施工性試験，第 26 回土木学会関東支部技術研究発表会，VI-042，pp.1046-1047，1999
- 26) 日下部昭彦ら：HEP&JES 工法におけるエレメントけん引力に関する一考察について，土木学会第 66 回年次学術講演会講演集，VI-074，pp.147-148，2011.9

第 2 章

- 27) 小泉秀之ら：地表面変位を抑えたエレメント掘進工法の開発，トンネル工学報告集第 19 巻，pp.279-283，2009.11
- 28) (財)原子力発電技術機構 廃止措置技術総合調査委員会：廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編，p.3-2，2007
- 29) 有光武ら：地表面変位を抑えたエレメント掘進工法の実証試験，土木学会トンネル工学研究論文・報告集第 19 巻，pp.285-290，2009.11
- 30) 西島和男他：鋼製エレメントを本体利用した地下構造物の施工特性，土木学会トンネル工学研究論文・報告集第 13 巻，pp.413-416，2003.11
- 31) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，pp.224-226，丸善，2000.11
- 32) 竹下貞雄他：URT 工法における推力の推定について，立命館大学理工学研究所紀要，第 61 号，pp.241-251，2002
- 33) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：近接工事設計施工マニュアル，pp.150-151，2005.10.
- 34) 市川博康，中田雅博：高速道路で非開削工法を行なう際の適正な路面沈下管理を目指して，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-049，2011.9.
- 35) 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部・設備部編：土木工事標準仕様書，pp.6-3，2009.9

第 3 章

- 36) 高橋保裕，桑原清，齋藤貴，中村征史，森山智明，本田諭：地盤切削 JES 工法による施工について(打越 Bv)，Structural Engineering Data, No. 36，pp. 128-135，JR 東日本，2011.9.
- 37) 岩瀬隆，長尾達児，本田諭，齋藤貴：地盤切削 JES 工法施工性確認試験，Structural Engineering Data, No. 41，pp. 62-65，JR 東日本，2013.5.

38) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物，pp. 91, 2007.1.

第4章

39) 本田諭，齋藤貴，井上宏和，尾関聡司：地盤切削 JES 工法で大規模函体を活線下施工—高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋新設—，トンネルと地下，第44巻8号，pp.7-15，土木工学社，2013.8

40) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：非開削工法設計施工マニュアル，pp.9-3，2009.7

41) 中山泰成，西村知晃，尾関聡司：施工報告 地盤切削 JES 工法による立体交差工事：高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋新設工事，土木施工，第54巻8号，pp.32-35，山海堂，2013.8

42) 戸塚淳也ら：リンク型軌道変位計測システムの信頼性向上，土木学会第62回年次学術講演会講演集，VI-056，pp.111-112，2007.9

43) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：近接工事設計施工マニュアル，pp.151，2004.12

44) 滝沢聡，中山泰成，本田諭，齋藤貴，小池弘明：地盤切削 JES 工法による列車運行時間帯における線路下横断工の施工，Structural Engineering Data, No. 41，pp. 66-75，JR 東日本，2013.5.

第5章

45) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル，pp.参 18-参 25，2011.10

46) 片桐雅明，石井武司，齋藤邦夫，増田達，相澤文也，鶴飼恵三：砂地盤中の泥水掘削溝壁の破壊メカニズムとその解釈，土木学会論文集，No.666，III-53，pp.127-143，2000

47) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：非開削工法設計施工マニュアル，pp.3-4，2009.7

48) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，pp.280-291，丸善，2000.2

49) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，pp.49，丸善，2001.3

50) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，pp.27，丸善，1999.11

51) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，pp.176，丸善，2001.3

52) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，pp.58，丸善，2007.1

53) 鉄道 ACT 研究会編：HEP&JES 工法技術資料，pp.施工-42，鉄道 ACT 研究会 HEP&JES 工法委員会，2012.3

54) 社団法人日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，pp.132-161，2003.11

- 55) 石橋忠良他：噛み合わせ継手の力学特性, 土木学会論文集, No.777,VI-65, pp.73-82, 2004.12
- 56) 三浦啓徳他：疲労特性に優れる JES 形鋼のアンダーパスへの適用, 川崎製鉄技報, Vol.34, No.4, pp.46-52, 2002
- 57) 労働省労働基準局長通達：下水道整備工事，電気通信施設建設工事等における労働災害の防止について，基発 204 号, 1975.4
- 58) 厚生労働省：建設業における総合的労働災害防止対策の推進について，別紙 1, 別添 2, 基発第 0322002 号,2007.3
- 59) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター編：非開削工法設計施工マニュアル, pp.7-24, 2009.7

謝 辞

本論文は、日本国土、特に都市部の過密化により慢性化している踏切での渋滞解消を目的とした単独立体交差、そのうちアンダーパスを安全に、効率的に行うことを目的とした非開削工法の開発について、著者が所属する鉄建建設㈱で担当しておりました研究成果をとりまとめたものです。本工法の開発は、平成18年から開始した東日本旅客鉄道㈱と㈱ジェイテック、鉄建建設㈱の共同開発を根幹としており、多くの皆様の御尽力と数々の御支援により、上部交通に影響を与えず、効率的にアンダーパスを構築できる工法として確立され、実際のプロジェクトに適用できるようになりました。

本論文をまとめるにあたり、早稲田大学創造理工学部博士課程後期在学中、早稲田大学創造理工学部社会環境工学科小泉淳教授には、論文の構成から、最終の校正に至るまで終始、きめ細やかな御指導を賜りました。心より感謝申し上げます。同大学創造理工学部社会環境工学科清宮理教授、同大学創造理工学部社会環境工学科秋山充良教授、同大学創造理工学部社会環境工学科小野潔教授、同大学創造理工学部社会環境工学科石橋忠良客員教授には、本論文の審査と貴重な御助言を賜り、感謝いたします。

特に、石橋忠良客員教授におかれましては、教授が東日本旅客鉄道㈱構造技術センター所長でおられた当時から、著者が出向させていただいた3年間を含め現在に至るまで、技術開発に関する心構えから、本開発の方向性等、本当に多くの御指導をいただきました。改めて、ここに深く感謝いたします。

また、著者にこのような機会を与えていただけることに格別の配慮をいただきました鉄建建設㈱林康雄代表取締役社長、菊地眞取締役土木本部長、柳下哲取締役管理本部長、熊井和雄取締役建設技術総合センター所長、松岡茂執行役員土木本部副本部長、中澤真司研究開発センター所長を始めとする会社幹部の方々に感謝申し上げます。

著者が開発を進めるにあたり、共同開発者である東日本旅客鉄道㈱構造技術センター清水満次郎、同本田諭副課長、東京工事事務所工事管理室渡邊明之室長、同齋藤貴課長、同小泉秀之副課長、㈱ジェイテック齋藤雅春代表取締役社長、同千葉敬介取締役工事管理本部長、同桑原清取締役技術企画本部長、鉄建建設㈱研究開発センター竹田茂嗣主幹研究員、岩瀬隆主席研究員、中村征史主席研究員、地下基礎技術部栗栖基彰部長、山本淳部長、岩沢理恵課長、西村知晃課長、中井寛課長をはじめ本開発メンバーとして携わった多くの方々には、開発の遂行にあたり、数え切れない多くの提案や示唆をいただきました。また論文として本研究をまとめるにあたっては、研究開発センター安保知紀主幹研究員には、論文執筆の先輩として多くの御助言をいただきました。また、地下基礎技術部篠田雪恵氏、福岡瑛莉奈氏、真弓隆太郎氏には、多くのご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

最後に、ひとつの工法の開発が、ここに書き記しきれない多くの皆様の御尽力と数々の御支援により成し遂げられたことに感謝の意と御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

2018年2月

長尾 達児

研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者
a.論文	
○1)	継手を有する鋼製角形エレメント掘進工法における姿勢制御方法に関する実験的研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), 第 73 巻 2 号, pp.47-58, 2017, 長尾達児, 小泉淳, 石橋忠良, 栗栖基彰, 岩瀬隆
2)	Construction of highway tunnel with renovation of the railroad viaduct, Proceedings of the World Tunnel Congress 2017.6, Keigo GUNJI, Satoshi HONDA, Akihiro WADA, Akiyuki WATANABE, Takahiro KANNO, Mitsuru SHIMIZU, Nobuhiko YAMADA, Takahiro KAMEYAMA, Tatsuji NAGAO
○3)	Construction of an underpass crossing in proximity of a railway track, ITA-AITES World Tunneling Conference 2016(WTC2016), Vol.2, pp.873-882, 2016.4, Satoshi HONDA, Toshinori TAKAHASHI, Hiroyuki ITOI, Mitsuru SHIMIZU, Hirokazu IZUMI, Motoaki KURISU, Tatsuji NAGAO
○4)	噛み合わせ継手で鋼製エレメントを接合した鋼コンクリートサンドイッチ部材の曲げ変形, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 第 71 巻 3 号, pp.248-256, 2015, 安保知紀, 石橋忠良, 松岡茂, 長尾達児, 栗栖基彰
○5)	JES 構造の正負交番載荷試験による耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻, ROMBUNNO.2154, 2013.6, 安保知紀, 松岡茂, 長尾達児
○6)	切削ワイヤを用いた改良 JES 工法で地表面変位を抑制, トンネルと地下 土木工学社 480 号 Vol.41 No.8, pp.49-58, 2010.8, 有光武, 桑原清, 小泉秀之, 長尾達児
b.報告	
○1)	アンダーパス工法における安全性向上への取り組み, 技術士 2014 年 12 月号, pp.16-19, 2014.12, 長尾達児
○2)	地盤切削 JES 工法の現場施工, 鉄建技術報告, pp.1-10, 2013.12, 泉宏和, 西村知晃, 栗栖基彰, 中井寛, 岩瀬隆, 長尾達児
○3)	地盤切削 JES 工法施工性確認試験, SED, JR 東日本, 41 巻, pp.62-65, 2013.5, 岩瀬隆, 長尾達児, 本田諭, 齋藤貴
○4)	地盤切削 JES 工法の開発, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 15 巻, pp.199-206, 土木学会, 2010.1, 中村征史, 桑原清, 長尾達児, 中井寛
○5)	地表面変位を抑えたエレメント掘進工法の開発, トンネル工学報告集第 19 巻, pp.279-283, 2009.11, 小泉秀之, 森山智明, 有光武, 長尾達児, 中井寛

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者
b.報告 (続き)	<p>○6) 地盤切削ワイヤーを用いたエレメント掘進，地盤工学研究発表会発表講演集，第46巻，ROMBUNNO.694，2011.7，小泉秀之，森山智明，齋藤貴，高橋保裕，長尾達児，中井寛</p> <p>7) 膨張コンクリートと合成短繊維を用いた JES 構造端部の地覆コンクリートのひび割れ抑制対策について，SED，JR 東日本，18 巻，pp.30-35，2002.5，細田暁，松田芳範，渡邊明之，長尾達児</p> <p>8) JES エレメントの曲げ，せん断特性について，SED，JR 東日本，16 巻，pp.150-159，2001.5，長尾達児，武田康司，松岡茂，齋藤雅春，渡邊明之，増田達 COMPASS（コンパス）工法の開発（特集 立体交差によるまちづくり），土木施工，山海堂，第47巻11号，pp.90-96，2006.11，清水満，鈴木尊，長尾達児</p> <p>9) 鉄道におけるカルバート構造物の最近の技術，基礎工 2001 年 3 月号，総合土木研究所，2001.3，増田達，新堀敏彦，渡邊明之，長尾達児</p>
c.講演	<p>○1) 地盤切削機構を用いた小断面ボックスカルバート推進工法の開発，土木学会第 71 回年次学術講演会，III-429，pp.857-858，2016.9，郡司圭悟，本田諭，齋藤貴，長尾達児，中村征史，坂博史</p> <p>○2) 安全性と効率性の向上を目的とした線路下横断工法の施工（その 2），土木学会第 71 回年次学術講演会，IV-361，pp.721-722，2016.9，長尾達児，森寛典，岡田英典，鶴飼晃成，中村征史</p> <p>3) 鉄道連続立体交差事業における新しい直下式地下化手法の開発，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 16 巻，pp.87-94，土木学会，2011.1，中井寛，齋藤雅春，長尾達児，森山智明</p> <p>4) 地盤切削・鋼板挿入工法（COMPASS 工法）の長距離化を目指して，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-289，pp.577-578，2010.9，伊藤康裕，小泉秀之，西村知晃，長尾達児，久保木司</p> <p>5) 鉄道営業線直下式地下化工法を目的とした長距離エレメント推進工法の開発，土木学会，土木建設技術発表会概要集，pp.75-80，2009，中井寛，齋藤雅春，千々岩三夫，長尾達児，十二正義，森山智明</p> <p>6) 鉄道立体交差事業における新しい直下式地下化工法の開発（その 2），土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-097，pp.193-194，2009.9，長尾達児，齋藤雅春，千々岩三夫，中井寛，森山智明，東智徳，尾上佑介</p>

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者
c.講演 (続き)	<p>14) 狭隘なエレメント内から施工可能な高圧噴射攪拌工法の開発 (その 1), 土木学会第 63 回年次学術講演会, 6-156, pp311-312, 2008.9, 有光武, 大久保啓一, 長尾達児, 長橋潤, 伊藤幸司, 高橋弘</p> <p>15) 狭隘なエレメント内から施工可能な高圧噴射攪拌工法の開発 (その 2), 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008.9, 6-157, pp313-314, 松友啓志, 長尾達児, 飯沼紀則, 伊藤幸司, 高橋弘, 飯高國和</p> <p style="text-align: right;">他 10 編</p>
(社内紀要)	<p>○1) HEP&JES 工法 広幅バケット掘削機の現場適用, 鉄建技術報告, pp.1-6, 2014.12, 西村知晃, 泉宏和, 栗栖基彰, 岩瀬隆, 長尾達児</p> <p>○2) 地盤切削 JES 工法の現場施工, 鉄建技術報告, pp.1-10, 2013.12, 泉宏和, 西村知晃, 栗栖基彰, 中井寛, 岩瀬隆, 長尾達児</p> <p>3) JES 構造の骨格曲線に基づいた耐震性能評価, 鉄建技術報告, pp.11-16, 2012.12, 安保知紀, 松岡茂, 長尾達児, 柳博文</p> <p>4) 地盤切削 JES 工法の実施工 (打越こ道橋), 鉄建技術報告, pp.35-41, 2011.12, 中井寛, 長尾達児, 山村康夫, 加藤義文</p> <p>○5) COMPASS 工法の適用事例-烏山線 滝・烏山間国道 294 号こ線橋 (歩道) 新設-, 鉄建技術報告, pp.9-14, 2008.12, 加藤健, 長尾達児, 栗栖基彰, 松友啓志</p> <p>6) COMPASS 工法の改良-二重鋼板による土砂押し出し方法の検討-, 鉄建技術報告, pp.1-8, 2008.12, 松友啓志, 長尾達児, 栗栖基彰</p> <p style="text-align: right;">他 4 編</p>
(特許)	<p>○1) 地下構造物構築用覆工エレメントの刃口構造及びその刃口を用いた掘進方法, 特許第 5845148 号, 2015.11.27</p> <p>○2) 管切削治具, 該管切削治具を用いた板材挿入工法及びエレメント挿入工法, 特許 5530981, 2014.4.25</p> <p>○3) 充填装置および充填工法, 並びに板材挿入工法, エレメント挿入工法, 特許第 5350443 号, 2013.8.30</p> <p>○4) 覆工エレメントの地山への貫入方法及び地盤切削装置, 特許第 5219859 号, 2013.3.15</p>